

Capítulo E

La compensación de la energía reactiva



La compensación de la energía reactiva

La compensación de la energía reactiva se realizará o no, localmente, globalmente o de forma mixta en función de los resultados del estudio técnico económico correspondiente.

La compensación de la energía reactiva

1. ¿Qué es el factor de potencia?

1.1. Naturaleza de la energía reactiva	E/13
1.2. Los consumidores de energía reactiva	E/14
Los receptores consumidores más importantes de energía reactiva	E/14
Los motores asíncronos	E/14
Los transformadores	E/14
Otros elementos	E/14
1.3. El factor de potencia	E/15
Definición del factor de potencia	E/15
Representación gráfica del cuadro de potencias	E/15
Potencia activa	E/15
Potencia reactiva	E/15
Potencia aparente	E/15
Medición de las potencias	E/16
Representación gráfica del cuadro de intensidades	E/17
1.4. La tangente de φ	E/17
1.5. Medida práctica del factor de potencia	E/17
Valor instantáneo	E/17
Valor medio	E/18
1.6. Valores prácticos del factor de potencia	E/18
Ejemplo de cálculo de las potencias	E/18
Los cálculos para la determinación de las potencias del motor trifásico	E/18
Factor de potencia de las cargas más usuales	E/19

2. ¿Por qué mejorar el factor de potencia?

2.1. Disminución de la factura eléctrica	E/21
El sistema tarifario español	E/21
La consideración de consumidor cualificado	E/21
El sistema tarifario para consumidores no cualificados	E/22
El sistema tarifario para consumidores cualificados	E/22
Por ejemplo	E/23
2.2. Optimización de las características técnico-económicas	E/24
Aumento de la potencia de un transformador	E/24
Disminución de las pérdidas de los cables	E/24
La intensidad aparente de una carga	E/24
La intensidad activa	E/24
La intensidad reactiva	E/24
Exposición	E/24
La resistencia del conductor	E/24
Las pérdidas	E/25
El coste de estas pérdidas	E/25

Corrección de la sección de un conductor en función del $\cos \varphi$	E/25
Disminución de la caída de tensión	E/25

3. ¿Cómo compensar una instalación?

3.1. Principio teórico	E/27
3.2. ¿Con qué compensar?	E/28
Compensación en BT	E/28
Condensadores fijos	E/28
Instalación	E/28
Emplazamiento	E/28
Baterías de condensadores con regulación automática	E/28
Emplazamiento	E/29
Principios y ventajas de la compensación automática	E/29

4. ¿Cómo compensar?

4.1. Compensación global	E/31
Principios	E/31
Ventajas	E/31
Inconvenientes	E/31
4.2. Compensación parcial	E/32
Principios	E/32
Ventajas	E/32
Inconvenientes	E/32
4.3. Compensación individual	E/32
Principios	E/32
Ventajas	E/33
Inconvenientes	E/33
4.4. Compensación en los bornes de un transformador	E/33
Compensación e incremento de la potencia de un transformador	E/33
¿Cuál será la potencia de la batería de condensadores necesaria para que la potencia aparente del transformador pueda suministrar la potencia activa de la instalación actual más la de la ampliación?	E/34
Potencia aparente y activa (en función del factor de potencia) de los transformadores usuales en el mercado	E/35
Compensación de la energía reactiva propia de un transformador	E/36
4.5. Compensación a los bornes de un motor asíncrono	E/36
Precaución general	E/36
Conexión	E/37
Arranque	E/37
Motores especiales	E/37
Regulación de las protecciones	E/37
Cómo evitar la autoexcitación de los motores asíncronos	E/38

Ejemplos	E/38
Motores de gran inercia	E/39
4.6. Cuándo realizar una compensación automática	E/39
Esquema de principio de una batería automática	E/39
Los elementos internos	E/39
Un equipo de compensación automático está constituido por tres elementos principales	E/40
Los elementos externos	E/40
Cómo instalar las baterías	E/40
En la compensación de un solo embarrado con una sola alimentación	E/40
La compensación de varios embarrados	E/41
La compensación en un embarrado alimentado por varios transformadores	E/41
El concepto de la regulación	E/42
Regulación física y eléctrica	E/42
Ejemplos	E/42
El regulador	E/44
La programación de un regulador	E/44
¿Qué es el C/K?	E/44
La importancia del ajuste del C/K	E/45
Interpretación del ajuste C/K	E/45

5. ¿Cómo determinar el nivel de compensación de la energía reactiva?

5.1. Métodos de cálculo	E/47
Balance de potencias, determinación de la potencia reactiva (a la concepción)	E/47
Balance de potencias de una instalación	E/47
Balance de consumos a partir de la facturación de la empresa suministradora, optimización técnico-económica (para una instalación existente)	E/47
Para determinar la potencia óptima de la batería de condensadores	E/47
Comprobación del recibo	E/48
5.2. Dimensionado de una batería de condensadores en presencia de armónicos	E/50
Problemas presentados por los armónicos	E/50
Elementos no generadores de armónicos	E/50
Elementos generadores de armónicos	E/51
Efectos de los armónicos sobre los condensadores	E/51
Soluciones posibles	E/52
Contra los efectos de los armónicos	E/52
Contra los fenómenos de resonancia	E/52
Elección de soluciones	E/52
Elementos a tener en consideración	E/52
Los filtros pasivos	E/53
Elección de una solución	E/54
Precauciones frente a los distribuidores de energía	E/55
Tabla para la realización de un preestudio de armónicos	E/56

5.3. Comparación de una instalación sin compensación con una con compensación	E/57
Instalaciones sin compensar	E/57
Instalaciones con compensación	E/57

6. Características de las baterías de condensadores

6.1. Características técnicas	E/59
Descripción	E/59
Tecnología	E/59
Ejemplo de ensamblajes de condensadores	
Varplus M1-M4 (400 V)	E/60
Características técnicas	E/61
Baterías automáticas	E/61
Descripción	E/61
Características técnicas	E/62
Esquema tipo de conexión de baterías automáticas	E/62
Reguladores Varlogic	E/63
Descripción	E/63
Características técnicas	E/63
Entradas	E/63
Salidas	E/64
Ajustes y programación	E/64
Ajustes de fábrica	E/64
Contactores específicos para condensadores	E/65
Descripción	E/65
Características técnicas	E/66
6.2. Dimensionado de los elementos de instalación y protección ...	E/74
Dimensionado de los componentes	E/74
Para las baterías de condensadores, la corriente absorbida es función de	E/74
La corriente nominal de un condensador	E/74
Las protecciones	E/74
Sección de los conductores	E/75
Protección de condensadores	E/75
Recomendaciones de instalación	E/76
Dimensionado de los cables	E/76
Conexión del TI	E/76
Conexión a tierra	E/77
Conexión de los dos cables de alimentación de la maniobra a los bornes correspondientes	E/77
Comprobación del par de apriete de los bornes de potencia ..	E/77

7. Ejemplos

Cálculo de la compensación del factor de potencia de una industria	E/79
Descripción de la industria	E/79
Potencias aparentes de las diferentes zonas de carga	E/79
Justificación de la elección de la forma de compensar	E/79
El ciclo de trabajo de la máquina es corto	E/79
Cómo compensar	E/80

Cálculo de la potencia y el $\cos \phi$ medio de la fábrica	E/80
La industria trabaja	E/80
Cálculo de la batería	E/81
1. ^{er} paso	E/81
2. ^o paso	E/81
3. ^{er} paso	E/81
4. ^o paso	E/81
5. ^o paso	E/81
6. ^o paso	E/82
7. ^o paso	E/82
8. ^o paso	E/82
9. ^o paso	E/82
10. ^o paso	E/82
Qué cambios de recargos y bonificaciones representa la compensación	E/83
Antes de compensar	E/83
Después de compensar	E/83

Tablas

1. ¿Qué es el factor de potencia?

E1-006: tabla del ejemplo de cálculo de potencias	E/18
E1-008: tabla de los valores del $\cos \phi$ y de la $\tan \phi$	E/19

2. ¿Por qué mejorar el factor de potencia?

E2-002: comparación del sistema tarifario anterior con el actual	E/23
E2-003: cálculo del recargo por energía reactiva en un recibo	E/23
E2-004: tabla de los factores de incremento de la sección de los conductores en función del factor de potencia	E/25

4. ¿Cómo compensar?

E4-005: potencia activa en kW que puede suministrar un transformador a plena carga en función del factor de potencia	E/35
E4-006: consumo de potencia reactiva para transformadores de distribución de $V1 = 20$ kV	E/36
E4-008: coeficientes de reducción de la intensidad de un motor sin compensar, al momento de compensar, en función del factor de potencia	E/37
E4-009: potencia máxima en kVAr a instalar, en la compensación individual de un motor asíncrono, sin provocar la autoexcitación	E/38

5. ¿Cómo determinar el nivel de compensación de la energía reactiva?

E5-001: tabla de análisis de potencias y factores de potencia	E/47
E5-002: tabla de valores de los conceptos de un recibo de energía ..	E/48
E5-003: tabla de coeficientes para calcular la potencia de la batería en VAr, en función del factor de potencia inicial y el deseado (final)	E/49
E5-006: consideraciones sobre los generadores más usuales de armónicos, en los circuitos eléctricos de distribución	E/51
E5-009: tabla de elección de una batería, limitando el efecto de los armónicos	E/54

6. Características de las baterías de condensadores

E6-003: temperaturas máximas admisibles en los condensadores .. E/61
 E6-007: tabla de ajuste manual del C/K para redes de 400 V E/64
 E6-008: tabla de características generales de los reguladores
 Varlogic E/65
 E6-010: tabla de elección de contactores específicos para el mando
 de condensadores E/66
 E6-011: condensadores Varplus M1, M4 gran potencia E/67
 E6-012: condensadores Rectibloc con interruptores automáticos ... E/68
 E6-013: baterías automáticas Minicap E/69
 E6-014: baterías automáticas Rectimat 2 estándar, clase H,
 clase SAH E/70
 E6-015: baterías automáticas Prisma estándar, clase H, clase SAH .. E/71
 E6-016: P400/P400 SAH y pletinas funcionales E/72
 E6-017: inductancias y accesorios E/73
 E6-018: tabla de dimensionado de interruptores automáticos para
 la protección de baterías E/76

7. Ejemplos

E7-001: tabla de valores del ejemplo de cálculo de compensación
 industrial E/80

Figuras, esquemas y diagramas

1. ¿Qué es el factor de potencia?

E1-001: esquema de la distribución de la energía en un motor E/13
 E1-002: los receptores consumidores de energía reactiva E/14
 E1-003: diagrama de potencias E/16
 E1-004: esquema trifásico de medida de las potencias activa
 y aparente E/17
 E1-005: diagrama de intensidades E/17
 E1-007: diagrama de potencias del ejemplo del motor trifásico E/18

2. ¿Por qué mejorar el factor de potencia?

E2-001: diagrama exponencial de valores del coeficiente Kr E/22

3. ¿Cómo compensar una instalación?

E3-001: esquema de principio de la compensación:
 $Q_c = P_a (tg \varphi - tg \varphi')$ E/27
 E3-002: ejemplo de condensadores fijos E/28
 E3-003: ejemplo de batería de regulación automática E/28
 E3-004: principio de funcionamiento de una batería automática
 y su instalación E/29
 E3-005: ejemplos de baterías de condensadores con regulación
 automática Minicap, Rectimat y baterías Prisma E/30

4. ¿Cómo compensar?

E4-001: compensación global E/31
 E4-002: compensación parcial E/32
 E4-003: compensación individual E/33
 E4-004: la compensación Q_c permite la ampliación S_2 sin tener
 que cambiar el transformador E/35
 E4-007: a la izquierda, el transformador suministra toda la energía
 reactiva para el motor; a la derecha, la batería suministra
 parte de esta energía E/37



E4-010: esquema de conexionado de una batería de condensadores a un motor asíncrono	E/39
E4-011: esquema de principio de un equipo de compensación automático	E/39
E4-012: esquema de conexión a un único embarrado de BT y ubicación del TI	E/41
E4-013: esquema de conexión a varios embarrados de BT, independientes, y ubicación del TI	E/41
E4-014: esquema de conexión a varios transformadores en paralelo y ubicación del TI	E/42
E4-015: escalonamientos 1.1.1.1 y 1.2.2.2	E/43
E4-016: en una batería bien elegida debe existir un equilibrio entre la regulación eléctrica y la física	E/43
E4-017: interpretación del ajuste C/K en un regulador de energía reactiva	E/45
5. ¿Cómo determinar el nivel de compensación de la energía reactiva?	
E5-004: cargas lineales que no generan armónicos	E/50
E5-005: las cargas no lineales que son capaces de crear armónicos ..	E/51
E5-007: curva de impedancias en función de la frecuencia para una instalación que incorpora equipos SAH (fr = 190 Hz) ..	E/53
E5-008: curva de impedancias en función de la frecuencia para una instalación que incorpora un filtro sintonizando los armónicos n. ^{os} 5, 7 y 11	E/54
6. Características de las baterías de condensadores	
E6-001: condensadores Varplus	E/59
E6-002: diagrama de diferentes ensamblajes de condensadores para la obtención de potencias superiores	E/60
E6-004: esquema de conexión batería Rectimat V	E/62
E6-005: regulador Varlogic R6	E/63
E6-006: regulador Varlogic RC12	E/63
E6-009: contactor específico para mando de contactores	E/66
E6-019: identificación de la misma fase con un voltímetro	E/77
E6-020: forma de conexión del transformador de intensidad	E/77

Reglamento electrotécnico para BT e Instrucciones Técnicas Complementarias. Hojas de interpretación

Instalación de receptores. Prescripciones generales ITC-BT-42

2.7. Compensación del factor de potencia	E/85
--	------

Instalación de receptores. Receptores para alumbrado ITC-BT-44

3.1. Condiciones generales	E/85
----------------------------------	------

Instalación de receptores. Transformadores y autotransformadores, reactancias y rectificadores, condensadores ITC-BT-48

2.3. Condensadores	E/86
--------------------------	------

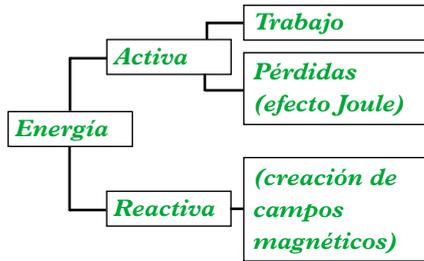
1. ¿Qué es el factor de potencia?

1.1. Naturaleza de la energía reactiva

Las redes de corriente eléctrica suministran energía que se utiliza para dos funciones distintas:

La energía activa, que se transforma en trabajo útil y calor.

La energía reactiva, que se utiliza para crear campos magnéticos (inducción).



Todas las máquinas eléctricas (motores, transformadores...) se alimentan, en corriente alterna, para dos formas de consumo: el que transforman en potencia activa, con las correspondientes pérdidas por efecto Joule (calentamiento), y el correspondiente a la creación de los campos magnéticos, que denominamos reactiva.

La energía activa corresponde a la potencia activa P dimensionada en W ; se transforma íntegramente en energía mecánica (trabajo) y en calor (pérdidas térmicas).

La energía reactiva corresponde a la energía necesaria para crear los campos magnéticos propios de su función.

Esta energía es suministrada por la red de alimentación (preferencialmente) o por los condensadores instalados para dicha función.

La red de suministro alimenta la energía aparente que corresponde a la potencia aparente, denominada S y dimensionada en (VA) .

La energía aparente es la resultante de dos energías vectoriales, la activa y la reactiva.

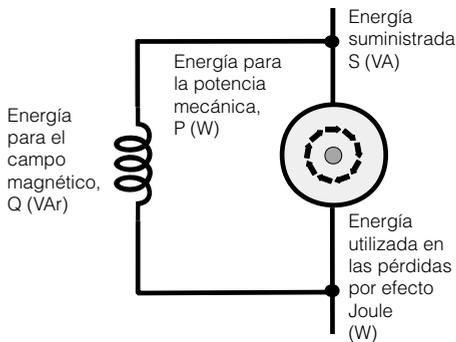


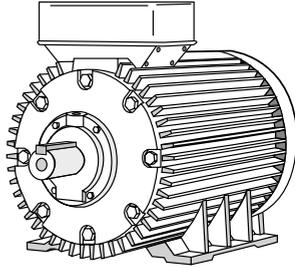
Fig. E1-001: esquema de la distribución de la energía en un motor.

1.2. Los consumidores de energía reactiva

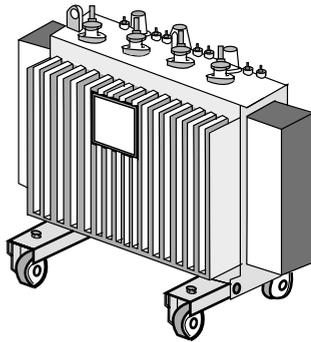
Los receptores utilizan una parte de su energía aparente (S) para energía reactiva (Q).

Los receptores consumidores más importantes de energía reactiva son:

Los motores asíncronos, en proporciones del 65 al 75% de energía reactiva (Q) en relación a la energía activa (P).



Los transformadores, en proporciones del 5 al 10% de energía reactiva (Q) en relación a la energía activa (P).



Otros elementos, como las reactancias de las lámparas fluorescentes y de descarga, o los convertidores estáticos (rectificadores), consumen también energía reactiva.

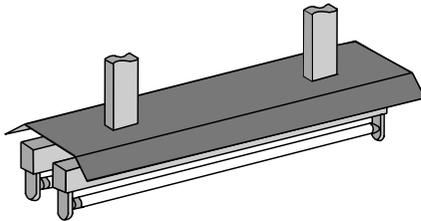


Fig. E1-002: los receptores consumidores de energía reactiva.

1.3. El factor de potencia

El factor de potencia (F) es la proporción de potencia activa en la potencia aparente.

Es tanto mejor cuando se acerca al valor de 1 (de 0 a 1).

$$F = \frac{P \text{ (kW)}}{S \text{ (kVA)}} = \cos \varphi$$

P = potencia activa (W)

S = potencia aparente (VA)

F = factor de potencia (cos φ)

Definición del factor de potencia

El factor de potencia de una instalación es el cociente de la potencia activa P (W) consumida por la instalación, en relación a la potencia aparente S (VA) suministrada para esta potencia activa.

Adquiere un valor entre 0 y 1.

El cos φ no tiene en cuenta la potencia propia de los armónicos.

Un factor de potencia próximo a 1 indica que la potencia absorbida de la red se transforma prácticamente en trabajo y pérdidas por calentamiento, optimizando el consumo.

Representación gráfica del cuadro de potencias

Potencia activa (en W)

■ Monofásica (fase-neutro):

$$P = U_0 \cdot I \cdot \cos \varphi$$

■ Bifásica (entre fases):

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

■ Trifásica (tres fases + neutro):

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Potencia reactiva (en VA)

■ Monofásica (fase-neutro):

$$Q = U_0 \cdot I \cdot \sin \varphi$$

■ Bifásica (entre fases):

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

■ Trifásica (tres fases + neutro):

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Potencia aparente (en VA)

■ Monofásica (fase-neutro):

$$S = U_0 \cdot I$$

- Bifásica (entre fases):

$$S = U \cdot I$$

- Trifásica (tres fases + neutro):

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

U_0 = Tensión entre fase y neutro.

U = Tensión entre fases.

Se utiliza, en forma clásica, la siguiente representación:

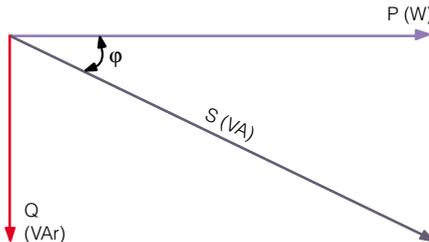


Fig. E1-003: diagrama de potencias.

Medición de las potencias

Si medimos la intensidad de cada fase con un amperímetro, la tensión con un voltímetro y la potencia con un vatímetro, tendremos que el vatímetro nos dará la potencia activa, y el producto de la intensidad por la tensión la potencia aparente.

W_{L1} = potencia de la fase R

W_{L2} = potencia de la fase S

W_{L3} = potencia de la fase T

A_{L1} = los amperios de la fase R

A_{L2} = los amperios de la fase S

A_{L3} = los amperios de la fase T

V_{L1} = la tensión simple de la fase R

V_{L2} = la tensión simple de la fase S

V_{L3} = la tensión simple de la fase T

La potencia aparente será:

$$I = \frac{I_{L1} + I_{L2} + I_{L3}}{3} \quad (A)$$

$$U = \frac{U_{0L1} + U_{0L2} + U_{0L3}}{3} \quad (V)$$

$$S = U \cdot I \quad (VA)$$

La potencia activa será:

$$P = P_{L1} + P_{L2} + P_{L3}$$

La potencia reactiva será:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

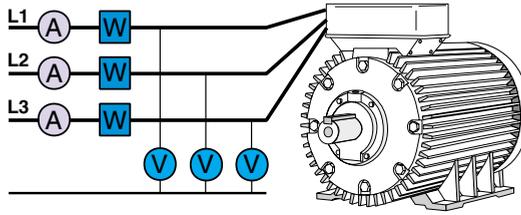


Fig. E1-004: esquema trifásico de medida de las potencias activa y aparente.

Representación gráfica del cuadro de intensidades

El diagrama de intensidades es homólogo al diagrama de potencias.

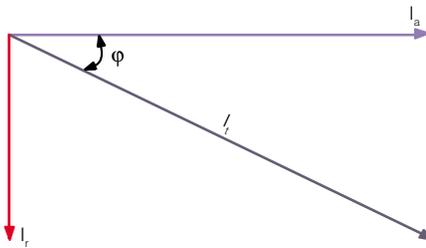
La intensidad activa y la reactiva se suman vectorialmente para formar la intensidad aparente, que se mide con un amperímetro.

El esquema es la representación clásica del diagrama de intensidades:

I_t = corriente total que circula por los conductores.

I_a = corriente activa.

I_r = corriente reactiva necesaria para la excitación magnética de los receptores.



$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$$

$$I_a = I_t \cdot \cos \varphi$$

$$I_r = I_t \cdot \sen \varphi$$

Fig. E1-005: diagrama de intensidades.

1.4. La tangente de φ

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\text{Energía (reactiva)}}{\text{Energía (activa)}} = \frac{Q \text{ (VAR)}}{P \text{ (W)}}$$

Algunos autores condicionan los cálculos a la tangente de φ en vez del $\cos \varphi$; la tangente de φ representa la cantidad de potencia reactiva necesaria por vatio de consumo.

Una tangente de φ ($\operatorname{tg} \varphi$) baja corresponde a un factor de potencia alto, poca potencia reactiva.

1.5. Medida práctica del factor de potencia

El factor de potencia o $\cos \varphi$ se puede medir según:

Valor instantáneo

Con un medidor de $\cos \varphi$.

Valor medio

Por dos medidores de potencia (vatímetros) para activa y reactiva, con registro durante un período largo o equipos de medición preparados (Varmetro).

1.6. Valores prácticos del factor de potencia

Ejemplo de cálculo de las potencias

Circuito	S (potencia aparente)	P (potencia activa)	Q (potencia reactiva)
Monofásico fase-N	$S = U_0 \cdot I$	$P = U_0 \cdot I \cdot \cos \varphi$	$Q = U_0 \cdot I \cdot \sen \varphi$
Bifásico 2 fases	$S = U \cdot I$	$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$	$Q = U \cdot I \cdot \sen \varphi$
Ejemplo: receptor de 5 kW $\cos \varphi = 0,5$	10 kVA	5 kW	8,7 KVAr
Trifásico 3 fases o 3 F + N	$S = \sqrt{3} UI$	$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$	$Q = \sqrt{3} UI \sen \varphi$
Ejemplo: motor $P_n = 51$ kW $\cos \varphi = 0,86$ $\eta = 0,91$	65 kVA	56 kW	33 kVAr

Tabla E1-006: tabla del ejemplo de cálculo de potencias.

Los cálculos para la determinación de las potencias del motor trifásico son los siguientes:

- P_n = potencia a disponer en el eje = 51 kW.
- La potencia activa a consumir, en función del rendimiento (η), será:

$$P = \frac{P_n}{\eta} = \frac{51}{0,9} = 56 \text{ kW}$$

- La potencia aparente absorbida a la red será:

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{56}{0,86} = 65 \text{ kVA}$$

En la tabla E1-009, pág. E/19, encontraremos la correspondencia entre la tg y el cos de un ángulo.

Para un $\cos \varphi = 0,86$, le corresponde una $tg \varphi = 0,59$:

$$Q = P \operatorname{tg} \varphi = 56 \cdot 0,59 = 33 \text{ kVAr}$$

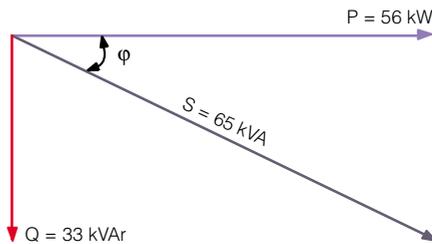


Fig. E1-007: diagrama de potencias del ejemplo del motor trifásico.

Factor de potencia de las cargas más usuales

Aparato			cos φ	tg φ
Motor asíncrono	carga a	0%	0,17	5,80
		25%	0,55	1,52
		50%	0,73	0,94
		75%	0,80	0,75
		100%	0,85	0,62
Lámparas incandescentes			1	0
Tubos fluorescentes no compensados			0,5	1,73
Tubos fluorescentes compensados			0,93	0,39
Lámparas de descarga			0,4 a 0,6	2,29 a 1,33
Hornos a resistencias			1	0
Hornos a inducción con compensación incorporada			0,85	0,62
Hornos a calentamiento dieléctrico			0,85	0,62
Hornos de arco			0,8	0,75
Máquinas de soldar a resistencia			0,8 a 0,9	0,75 a 0,48
Electrodos monofásicos, estáticos de soldadura al arco			0,5	1,73
Electrodos rotativos de soldadura al arco			0,7 a 0,9	1,02 a 0,48
Transformadores-rectificadores de soldadura al arco			0,7 a 0,9	1,02 a 0,75

Tabla E1-008: tabla de los valores del cos φ y de la tg φ .

2. ¿Por qué mejorar el factor de potencia?

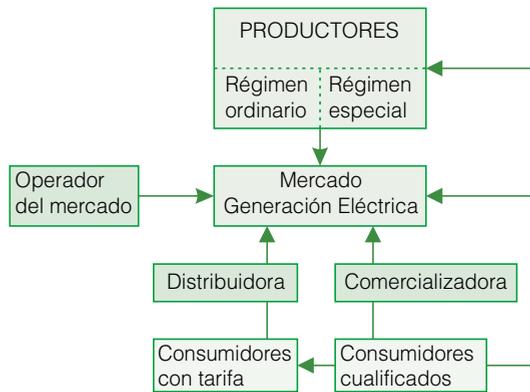
2.1. Disminución de la factura eléctrica

La mejora del factor de potencia de una instalación presenta múltiples ventajas de orden económico y eléctrico y permite reducir el coste del kWh.

El sistema tarifario español

En el capítulo D, apartado 2, donde describimos el sistema tarifario español, encontraremos los conceptos de bonificaciones y recargos por energía reactiva, aplicable sobre los importes de los términos de potencia y energía, no aplicable a otros términos, recargos o impuestos en baja tensión.

Con la ley 54/1997 del Sector Eléctrico se inició el proceso de liberalización del sector. A partir de entonces, el mercado eléctrico pasó a tener una estructura horizontal en la que se creó una separación entre la generación, el transporte, la distribución y la comercialización, y en la que el consumidor puede escoger libremente la empresa comercializadora o ir directamente al mercado.



Uno de los aspectos importantes, desde el punto de vista de los consumidores, fue la creación de la figura del consumidor cualificado, como aquel que podía elegir libremente su suministrador/comercializador o acudir directamente al mercado para la compra de energía eléctrica, con independencia del distribuidor de la zona eléctrica en donde se localiza el suministro.

Por el uso de las redes de transporte y distribución debería abonar a este distribuidor un peaje regulado incluido en las denominadas tarifas de acceso.

La consideración de consumidor cualificado

Fue evolucionando de la siguiente forma, en función de los consumos anuales:

Fecha de efecto	Niveles de consumo año anterior	Equivalencia en kWh/año
01/01/1998	Superior a 15 GWh (*)	15.000.000
01/01/1999	Superior a 5 GWh	5.000.000
01/04/1999	Superior a 3 GWh	3.000.000
01/07/1999	Superior a 2 GWh	2.000.000
01/10/1999	Superior a 1 GWh	1.000.000

Hasta que mediante el Real Decreto-Ley 6/1999, se estableció que a partir del 1 de julio del año 2000, todos los titulares de suministros en alta tensión (tensiones superiores a 1.000 V), con independencia del nivel de consumo serían

consumidores cualificados (el resto de los consumidores serán cualificados a partir del 1 de enero del año 2003, tal y como ha sido establecido por el Real Decreto Ley 6/2000, de 23 de junio).

En cuanto a las tarifas eléctricas y a la penalización por consumo de reactiva, han coexistido dos tipos:

■ La tarifa para consumidores no cualificados, en las que el complemento por el consumo de reactiva sigue con el recargo tradicional: $K_r(\%) = \frac{17}{\cos \varphi^2} - 21$.

■ Para los consumidores cualificados que accedían al mercado se establecieron las “tarifas de acceso”, que comprendían los peajes por utilización de las redes de distribución.

El sistema tarifario para consumidores no cualificados

En el capítulo D, apartado 2, donde describimos el sistema tarifario español, encontraremos los conceptos de bonificaciones y recargos por energía reactiva, aplicable sobre los importes de los términos de potencia y energía, no aplicable a otros términos, recargos o impuestos: $K_r(\%) = \frac{17}{\cos \varphi^2} - 21$.

Este coeficiente tiene dos límites, +47 % y -4 %; el límite de +47 % corresponde a un $\cos \varphi$ de 0,5.

El coeficiente negativo actúa de bonificación sobre los términos de potencia y energía.

El punto de inflexión entre el positivo y el negativo corresponde a un $\cos \varphi$ de 0,9.

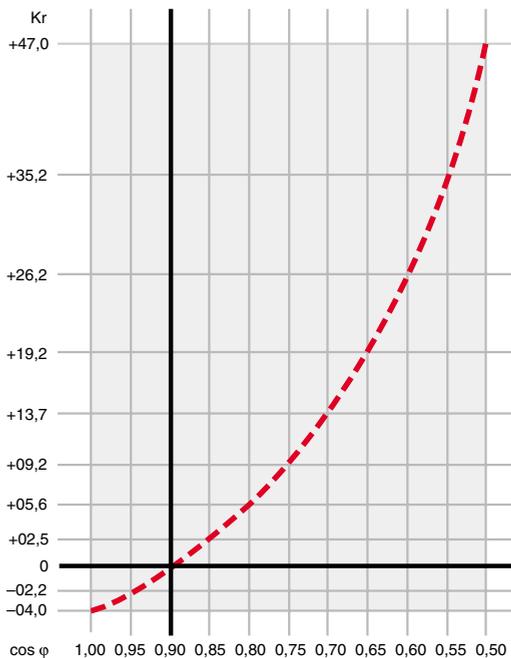


Fig. E2-001: diagrama exponencial de valores del coeficiente Kr.

El sistema tarifario para consumidores cualificados

Las primeras tarifas de acceso se publicaron en el Real Decreto 2820/1998, y en ellas no se contemplaba ningún complemento por energía reactiva en tarifas de alta tensión y en tarifas de BT, se seguía aplicando el recargo tradicional.

2. ¿Por qué mejorar el factor de potencia?

A la mayoría de clientes cualificados se les dejó de penalizar por el consumo de energía reactiva. Pero a finales del año 2001, y mediante el Real Decreto 1164/2001, se estableció una nueva estructura de las tarifas de acceso, contemplándose ya la penalización por el consumo de energía reactiva.

Tarifa antigua RD 2820/1998		Tarifa nueva RC 1164/2001	
Baja tensión		Baja tensión	
2.0	General, potencia no superior a 15 kW	2,0 A	Simple para baja tensión
3.0	General	3,0 A	General para baja tensión
4.0	General, larga utilización	3,0 A	General para baja tensión
B.0	Alumbrado público	3,0 A	General para baja tensión
R.0	Riegos agrícolas	3,0 A	General para baja tensión
Alta tensión		Alta tensión	
Tarifas T de tracción		Tarifas generales de alta tensión	
T.1	No superior a 36 kV	6,1 o 3,1 A	No superior a 36 kV (1)
T.2	Mayor de 36 kV y no superior a 72,5 kV	6,2	Mayor de 72,5 kV
T.3	Mayor de 72,5 kV	6,3	Mayor de 72,5 kV
Tarifas D distribuidores		Tarifas generales de alta tensión	
D.1	No superior a 36 kV	6,1 o 3,1 A	No superior a 36 kV (1)
D.2	Mayor de 36 kV y no superior a 72,5 kV	6,2	Mayor de 36 kV y no superior a 72,5 kV
D.3	Mayor de 72,5 kV y no superior a 145 kV	6,3	Mayor de 72,5 kV y no superior a 145 kV
D.4	Mayor de 145 kV	6,4	Mayor de 145 kV
Tarifas generales de AT		Tarifas generales de AT	
Escalón 1	No superior a 14 kW	6,1 o 3,1 A	No superior a 36 kW (1)
Escalón 2	Mayor de 14 kV y no superior a 35 kV	6,1 o 3,1 A	No superior a 36 kW (1)
Escalón 3	Mayor de 36 kV y no superior a 72,5 kV	6,2	Mayor de 36 kV y no superior a 72,5 kV
Escalón 4	Mayor de 72,5 kV y no superior a 145 kV	6,3	Mayor de 72,5 kV y no superior a 145 kV
Escalón 5	Mayor de 145 kV	6,4	Mayor de 145 kV
Escalón 6	Conexiones internacionales	6,5	Conexiones internacionales

(1) Se aplicará la tarifa 3.1 cuando la potencia contratada en todos los períodos sea igual o inferior a 450 kW, en caso contrario se aplicará la 6.1.

Tabla E2-002: comparación del sistema tarifario anterior con el actual.

En cuanto al término de facturación de energía reactiva, se establece que la penalización por consumo de reactiva es de:

- Aplicación a cualquier tarifa, salvo 2,0 A.
- Aplicación a todos los períodos tarifarios, excepto:
 - El tercer período de la tarifa 3,0 A y 3,1 A.
 - El sexto período de la tarifa 6.

Y sólo se aplica cuando el consumo de energía reactiva es superior al 33 % o sea cuando el $\cos \varphi$ de la instalación es menor de 0,95 (0,944).

El recargo está valorado, según el Real Decreto 1483/2001 en 0,06962 €/kVarh (6,15 pts. kVarh), al superar el 33 % de los kWh del término de energía.

Por ejemplo (consumos en recibos):

Período	Término de energía kWh	Término de reactiva kVarh	El 33 % del término de energía	Exceso kVarh	Recargo en (€) Unitario €/kVarh	Total
P3	15.432	9.996	5.093	4.903	0,06962	181,24
P4	28.387	14.699	9.368	5.331	0,06962	197,06
P6	37.056	16.860	12.228	4.632	Exento	-
						378,30 €

Tabla E2-003: cálculo del recargo por energía reactiva en un recibo.

En la factura de la compañía comercializadora podríamos observar (aproximadamente):

Término de energía reactiva $10.234 \text{ kVArh} \cdot 0,036963 \text{ €/kVArh} = 378,30 \text{ €}$.

Sin la lectura de los contadores, es difícil averiguar de donde salen los 10.234 kVArh ($4.903 + 5.331$), cosa que puede llevar a confusión en el momento de recibir la factura.

2.2. Optimización de las características técnico-económicas

La mejora del factor de potencia optimiza el dimensionado de la instalación, transformadores, aparamenta, cables, etc. Reduce las pérdidas de la línea y las caídas de tensión.

Un buen factor de potencia permite optimizar las características técnico-económicas relativas a una instalación, evitando el sobredimensionado de los elementos y optimizando su utilización.

Aumento de la potencia de un transformador

La instalación de condensadores aguas abajo de un transformador de potencia, que alimenta una instalación donde el $\cos \varphi$ es bajo, permite un aumento de la potencia activa disponible en bornes de BT y nos permite incrementar la carga de la instalación sin cambiar el transformador.

Esta posibilidad la desarrollamos en el apartado 6 de este capítulo.

Disminución de las pérdidas de los cables

La intensidad de circulación en un conductor y su naturaleza son factores directos en las pérdidas de un conductor; a igualdad de naturaleza la intensidad a circular será la determinante de las pérdidas.

La intensidad de alimentación de una carga, según el apartado 1.3, pág. E/17, es la (I_t) intensidad total (aparente). A medida que reducimos el $\cos \varphi$ nos acercamos a la (I_a) intensidad activa, menor que (I_t); por tanto, la intensidad que circulará por el conductor será menor y sus pérdidas menores.

Ejemplo:

La intensidad aparente de una carga es 125 A y $\cos \varphi = 0,6$; $I_t = 125 \text{ A}$.

La intensidad activa será: $I_a = I_t \cdot \cos \varphi = 125 \cdot 0,6 = 75 \text{ A}$.

La intensidad reactiva que se necesita para compensar la intensidad aparente hasta equilibrar a la activa es: $I_r = I_a \cdot \operatorname{tg} \varphi = 75 \cdot 1,33 = 99,75 \text{ A}$.

- Si no compensamos, la intensidad que circulará será de 125 A.
- Si compensamos totalmente, la intensidad será de 75 A.

Exposición

Si tenemos instalado un conductor de 16 mm^2 y una longitud de 30 m, la explotación de la línea es de 8 horas diarias, y se trabaja 22 días al mes, el coste del kW/h es de 0,09 € (15 ptas.), tendremos que:

La resistencia del conductor por metro lineal de línea (2 conductores) en Ω/m .

$$R = (1,25 \cdot \rho_{20}) \frac{2L}{S} = 1,25 \cdot \frac{1}{56} \cdot \frac{2 \cdot 1 \text{ m}}{16 \text{ mm}^2} = 0,0027901 \text{ } \Omega/\text{m}$$

Nota: La resistividad del conductor ha de corresponder a la temperatura de trabajo, por tanto se acepta incrementar un 25 % la resistividad a 20 °C.

Las pérdidas:

■ Las pérdidas por metro de línea, en el conductor de 16 mm² con 125 A, serán: $P_{cu125} = R \cdot I^2 = 0,0027901 \Omega/m \cdot 125^2 A = 43,595 W/m$.

■ Las pérdidas por metro de línea, en el conductor de 16 mm² con 75 A, serán: $P_{cu75} = R \cdot I^2 = 0,0027901 \Omega/m \cdot 75^2 A = 15,694 W/m$.

■ La diferencia de las pérdidas por el paso de las dos intensidades será: $P_{cu} = P_{cu125} - P_{cu75} = 43,595 W/m - 15,694 W/m = 27,901 W/m$.

El coste de estas pérdidas será:

Coste = 0,027901 kW/m · 30 m · 8 h/día · 22 días · 0,09 €/kW/h = 13,258 € (2.206 ptas.).

Este valor de pérdidas no está incluido en los recargos por energía reactiva, es energía transformada en calor y se contabiliza en el contador de energía activa.

En función de cómo compensemos el factor de potencia obtendremos diferentes resultados.

Corrección de la sección de un conductor en función del cos φ

La sección de un conductor calculado para una carga con cos φ = 1, si cambiamos el cos φ, la sección deberemos incrementarla según la tabla adjunta:

cos φ	1	0,80	0,60	0,40
factor multiplicador	1	1,25	1,67	2,50

Tabla E2-004: tabla de los factores de incremento de la sección de los conductores en función del factor de potencia.

Disminución de la caída de tensión

La compensación del factor de potencia reduce las pérdidas en los conductores y consecuentemente disminuye la caída de tensión.

3. ¿Cómo compensar una instalación?

3.1. Principio teórico

Mejorar el factor de potencia de una instalación consiste en instalar un condensador al lado del consumidor de energía reactiva. Esto se denomina compensar una instalación.

La instalación de una batería de condensadores de potencia Q_c disminuye la cantidad de energía reactiva suministrada por la red.

La potencia de la batería de condensadores a instalar se calcula a partir de la potencia activa de la carga (P_a en W) y su desfase con respecto a la tensión, corriente, antes de la compensación (φ) y después de la compensación (φ').

El hecho de instalar una batería de condensadores general es un método simple de asegurar un buen factor de potencia. A esto se llama compensar una instalación.

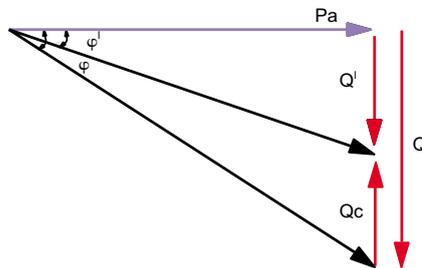


Fig. E3-001: esquema de principio de la compensación: $Q_c = P_a (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi')$.

El diagrama de la figura ilustra el principio de compensación de la potencia reactiva Q de una instalación a un valor de Q' por la conexión de una batería de condensadores de potencia Q_c . La actuación de la batería logra que la potencia aparente S pase al valor de S' .

Ejemplo:

Consideremos un motor que, en régimen normal, absorbe una potencia de 100 kW con un $\cos \varphi = 0,75$, $\operatorname{tg} \varphi = 0,88$.

Para pasar a un $\cos \varphi$ de 0,93, $\operatorname{tg} \varphi = 0,40$ la potencia de la batería a instalar será:

Los elementos de elección del nivel de compensación y del cálculo de la potencia en VAR de la batería dependen de la instalación a considerar.

En los apartados 5, 6 y 7 de este capítulo especificaremos las formas de compensación de forma general, para transformadores y para motores respectivamente.

Nota: En referencia a la compensación deberemos tener ciertas precauciones, por ejemplo:

- Debemos evitar sobredimensionar la compensación en los motores.
- Debemos evitar la compensación de los motores en vacío.

3.2. ¿Con qué compensar?

La compensación de la energía reactiva puede realizarse con condensadores fijos.



Fig. E3-002: ejemplo de condensadores fijos.

La compensación de la energía reactiva se realiza, generalmente, con baterías de condensadores con regulación automática.



Fig. E3-003: ejemplo de batería de regulación automática.

Compensación en BT

En BT la compensación se realiza con dos tipos de equipos:

Los condensadores fijos.

Los equipos de regulación automática o baterías automáticas, que permiten ajustar permanentemente la compensación en función de la carga.

Condensadores fijos

Estos condensadores son de una potencia unitaria fija y constante.

Instalación:

- Manual: mando por interruptor automático o interruptor.
- Semiautomático: mando por medio de contactor.
- Directo: conectado a los bornes de un receptor.

Emplazamiento:

- En bornes de una carga de tipo inductiva (motores, transformadores, reactivancias...).
- Sobre un embarrado que alimenta diversas cargas inductivas y en el que una compensación individual sería demasiado costosa.

Baterías de condensadores con regulación automática

Este tipo de equipamiento permite la adaptación automática de la potencia reactiva suministrada por los condensadores, en función de la potencia reactiva solicitada en cada momento para ajustar el sistema a un $\cos \varphi$ prefijado.

Emplazamiento:

- A los bornes de la alimentación general.
- A los embarrados de los cuadros de distribución de grandes potencias.

Principios y ventajas de la compensación automática

Las baterías con regulación automática permiten la adaptación de la compensación a la variación de carga.

Instaladas en la cabecera de la instalación de BT o en los cuadros de distribución con un consumo importante de energía reactiva.

Las baterías automáticas de condensadores están formadas por escalones de energía reactiva. El valor del $\cos \varphi$ se detecta por medio de un regulador, que actúa automáticamente en la conexión y desconexión de los escalones de la batería, adaptando la potencia de la batería a las necesidades de la energía reactiva a compensar y ajustando el máximo posible al $\cos \varphi$ medio deseado.

El regulador detecta las potencias a través de los secundarios de uno o varios transformadores de intensidad.

Los transformadores de intensidad deben situarse aguas arriba de la batería.

La batería automática permite la adaptación de la potencia de compensación a la potencia reactiva de la carga, evitando el envío de energía capacitiva a la red de suministro. En el caso de que la red de suministro sea la red pública, este fenómeno está prohibido por el RE de BT.

No obstante, puede suceder, en circunstancias determinadas, que esta energía sea beneficiosa para la red pública y la legislación específica, en estos casos, que las empresas suministradoras de energía podrán comprobar si el abonado crea perjuicios a la red pública y, en tal caso, deberán compensar la instalación y si no se modifica adecuadamente pueden cortar el suministro.

Este problema suele suceder con compensaciones fijas, y su alternativa es solucionar el problema con baterías de condensadores de regulación automática.

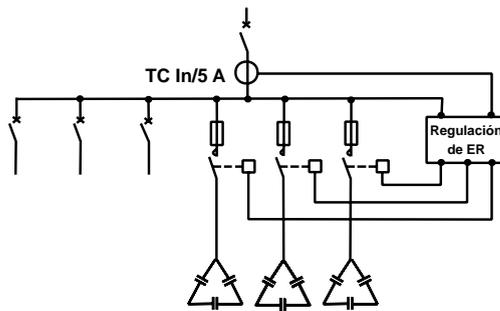


Fig. E3-004: principio de funcionamiento de una batería automática y su instalación.



Fig. E3-005: ejemplos de baterías de condensadores con regulación automática Minicap, Rectimat y baterías Prisma.

4. ¿Cómo compensar?

La localización de condensadores de BT sobre una red eléctrica constituye un indicio de diseño de red moderna. La compensación de una instalación puede realizarse de diferentes formas.

La compensación puede ser:

- Global.
- Por sectores.
- Individual.

En principio, la compensación ideal es aquella que limita el campo de actuación de la energía reactiva al entorno más próximo a su creación. Pero los criterios técnico-económicos determinarán su situación.

4.1. Compensación global

Si la carga es estable y continua, una compensación global es adecuada.

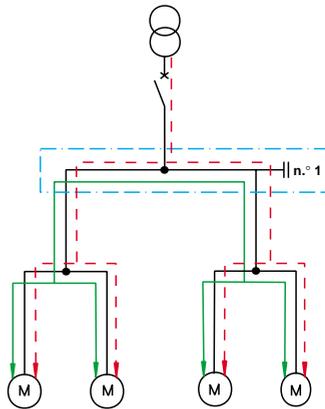


Fig. E4-001: compensación global.

Principios

La batería es conectada en cabecera de la instalación. Asegura una compensación global de la instalación. Estará en servicio parejo con la red a que se aplica.

Ventajas

- Los niveles de consumo propios de la instalación permiten dimensionar una mínima potencia de la batería y un máximo de horas de funcionamiento. Estas características permiten una rápida amortización.
- Suprime las penalizaciones por energía reactiva en el recibo de energía eléctrica.
- Disminuye la potencia aparente acercándola a la potencia activa.
- Optimiza el rendimiento del transformador de suministro.

Inconvenientes

- La corriente reactiva circula por toda la instalación.
- Las pérdidas por calentamiento (Joule) se mantienen y no permite una reducción de su dimensionamiento, aguas abajo de la instalación de la batería.

4.2. Compensación parcial

Una compensación parcial es aconsejable cuando la distribución de cargas es muy desequilibrada y de un cuadro de distribución depende una carga importante.

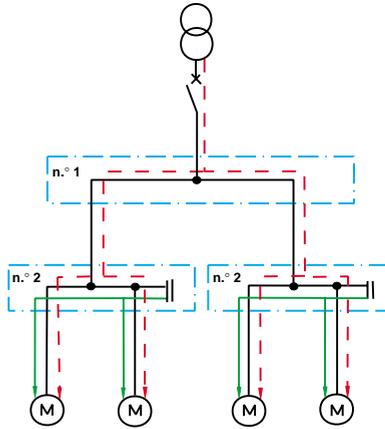


Fig. E4-002: compensación parcial.

Principios

La batería se conecta en el cuadro de distribución y genera la energía reactiva necesaria para compensar un grupo de cargas determinadas.

En una gran parte de la instalación, aligera, en particular a los cables de alimentación, las pérdidas por calentamiento.

Ventajas

- Suprime las penalizaciones por energía reactiva.
- Disminuye la potencia aparente acercándola a la potencia activa.
- Optimiza el rendimiento del transformador de suministro.
- Optimiza una parte de la instalación entre los puntos 1 y 2.

Inconvenientes

- La corriente reactiva circula desde el nivel 2, aguas abajo de la instalación.
- Las pérdidas por calentamiento (Joule) se mantienen a partir del nivel 2 y no permite una reducción del dimensionamiento de la instalación.

Si los escalones no están bien dimensionados, en función de la potencia y su propio reparto en cargas individuales, lleva el riesgo de sobredimensionamiento en períodos determinados.

4.3. Compensación individual

Una compensación individual es aconsejable cuando existen cargas muy importantes en relación a la carga total. Es el tipo de compensación que aporta más ventajas.

Principios

La batería se conecta a los bornes de una carga muy importante (motor de gran potencia, horno eléctrico...).

La potencia en kVAr representa un 25 % de los kW de la carga.

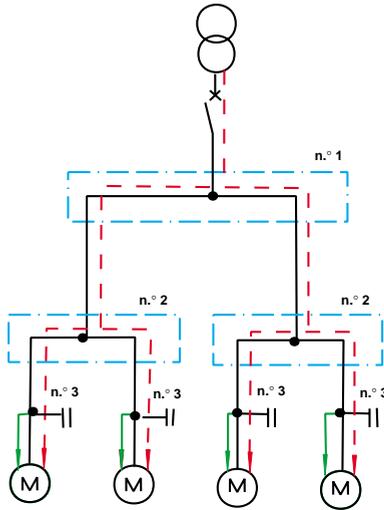


Fig. E4-003: compensación individual.

Es importante poder compensar lo más cerca posible de la fuente de energía inductiva, pero se debe complementar con una compensación de general al lado de la alimentación.

Ventajas

- Suprime las penalizaciones por energía reactiva.
- Disminuye la potencia aparente acercándola a la potencia activa.
- Optimiza el rendimiento del transformador de suministro.
- Optimiza la mayor parte de la instalación.

Inconvenientes

- El coste de la instalación sólo es rentable con cargas muy inductivas y regulares.

4.4. Compensación en los bornes de un transformador

Compensación e incremento de la potencia de un transformador

La instalación de una batería de condensadores puede evitar el cambio de un transformador por una simple ampliación de carga.

La potencia activa disponible en el secundario de un transformador es mayor a medida que el factor de potencia se acerque al máximo $\cos \varphi$.

Es interesante este fenómeno, puesto que puede darse el caso que para una pequeña ampliación no sea necesario cambiar el transformador, sólo mejorar el factor de potencia.

La tabla E4-005 da los valores de potencia de un transformador a plena carga en función del $\cos \varphi$ de la instalación.

Ejemplo:

Una instalación es alimentada por un transformador de:

- Potencia de 630 kVA.
- La potencia activa necesaria por la carga es $P_1 = 450$ kW.

- Factor de potencia medio de la carga es de $\cos \varphi = 0,8$.
- La potencia aparente que necesita la carga será:

$$S_1 = \frac{450}{0,8} = 562 \text{ kVA}$$

- La potencia reactiva de esta carga será:

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = 337 \text{ kVAR}$$

Una ampliación de la industria necesita una:

- Potencia activa de $P_2 = 100 \text{ kW}$.
- Factor de potencia $\cos \varphi = 0,7$.
- La potencia aparente de la ampliación será:

$$S_2 = \frac{100}{0,7} = 143 \text{ kVA}$$

- La potencia reactiva de la ampliación será:

$$Q_2 = \sqrt{S_2^2 - P_2^2} = 102 \text{ kVAR}$$

- La potencia aparente instalada y la potencia aparente de la ampliación son:

$$S_t = S_1 + S_2 = 664 \text{ kVA}$$

- Superiores a la potencia del transformador:

$$S_t = 664 > S = 630 \text{ kVA}$$

- La potencia activa total necesaria será:

$$P_t = P_1 + P_2 = 550 \text{ kW}$$

¿Cuál será la potencia de la batería de condensadores necesaria para que la potencia aparente del transformador pueda suministrar la potencia activa de la instalación actual más la de la ampliación?

Para que con la potencia del transformador ($S = 630 \text{ kVA}$) se pueda suministrar, la potencia activa de la instalación existente más la de la ampliación se ha de limitar la potencia reactiva a un máximo.

- El máximo posible será:

$$Q_{\text{máx}} = \sqrt{S^2 - P_t^2} = \sqrt{630^2 - 550^2} = 307 \text{ kVA}$$

La potencia reactiva que necesita la instalación más la ampliación es:

$$Q_t = Q_1 + Q_2 = 337 + 102 = 439 \text{ kVAR}$$

Si la que necesita la instalación es de 439 kVAR y la máxima que puede suministrar el transformador es de 307 kVAR , el resto lo debemos suministrar con una batería de condensadores:

$$Q_c = Q_t - Q_{\text{máx}} = 439 - 307 = 132 \text{ kVAR}$$

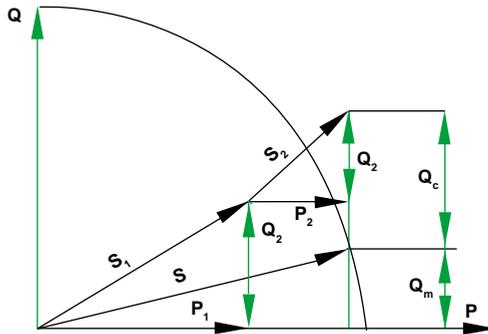


Fig. E4-004: la compensación Q_c permite la ampliación S_2 sin tener que cambiar el transformador.

El concepto que hemos resaltado ha sido simplemente el de no tener que ampliar la potencia del CT. Si deseamos eliminar los costes de la energía reactiva absorbida por la red, debemos compensar totalmente la energía reactiva necesaria.

**Potencia aparente y activa (en función del factor de potencia)
de los transformadores usuales en el mercado**

tg φ	cos φ	Potencia aparente nominal del transformador (kVA)											
		100	160	250	315	400	500	630	800	1.000	1.250	1.600	2.000
0,00	1	100	160	250	315	400	500	630	800	1.000	1.250	1.600	2.000
0,20	0,98	98	157	245	309	392	490	617	784	980	1.225	1.568	1.960
0,29	0,96	96	154	240	302	384	480	605	768	960	1.200	1.536	1.920
0,36	0,94	94	150	235	296	376	470	592	752	940	1.175	1.504	1.880
0,43	0,92	92	147	230	290	368	460	580	736	920	1.150	1.472	1.840
0,48	0,90	90	144	225	284	360	450	567	720	900	1.125	1.440	1.800
0,54	0,88	88	141	220	277	352	440	554	704	880	1.100	1.408	1.760
0,59	0,86	86	138	215	271	344	430	541	688	860	1.075	1.376	1.720
0,65	0,84	84	134	210	265	336	420	529	672	840	1.050	1.344	1.680
0,70	0,82	82	131	205	258	328	410	517	656	820	1.025	1.312	1.640
0,75	0,80	80	128	200	252	320	400	504	640	800	1.000	1.280	1.600
0,80	0,78	78	125	195	246	312	390	491	624	780	975	1.248	1.560
0,86	0,76	76	122	190	239	304	380	479	608	760	950	1.216	1.520
0,91	0,74	74	118	185	233	296	370	466	592	740	925	1.184	1.480
0,96	0,72	72	115	180	227	288	360	454	576	720	900	1.152	1.440
1,02	0,70	70	112	175	220	280	350	441	560	700	875	1.120	1.400

Tabla E4-005: potencia activa en kW que puede suministrar un transformador a plena carga en función del factor de potencia.

Compensación de la energía reactiva propia de un transformador

La energía reactiva que consume un transformador no es despreciable (del orden del 5%); ella puede ser suministrada por una batería de condensadores.

La cantidad de energía (reactiva) que absorbe es función de la corriente magnetizante en vacío o en carga. Para los transformadores de alimentación y la contratación en MT, es importante, para reducir los recargos y las pérdidas, compensar dicho consumo.

Este capítulo está dedicado a BT; por tanto sólo consideraremos la función de los transformadores para cambios de tensión BT/BT o de régimen de neutro. La compensación de los BT/BT puede realizarse a los bornes del transformador sin regulación automática, para el valor en vacío y las variaciones correspondientes a la carga por una compensación general regulable.

Un transformador absorbe energía (reactiva) para asegurar su función.

Compensación de la energía reactiva de los transformadores en kVAr					
Transformador		En aceite		Seco	
S (kVA)	Ucc (%)	Vacío	Carga	Vacío	Carga
100	4	2,5	5,9	2,5	8,2
160	4	3,7	9,6	3,7	12,9
250	4	5,3	14,7	5	19,5
315	4	6,3	18,3	5,7	24
400	4	7,6	22,9	6	29,4
500	4	9,5	28,7	7,5	36,8
630	4	11,3	35,7	8,2	45,2
800	4	20	66,8	10,4	57,5
1.000	6	24	82,6	12	71
1.250	5,5	27,5	100,8	15	88,8
1.600	6	32	126	19,2	113,9
2.000	7	38	155,3	22	140,6
2.500	7	45	191,5	30	178,2

Tabla E4-006: consumo de potencia reactiva para transformadores de distribución de $V_1 = 20$ kV.

4.5. Compensación a los bornes de un motor asíncrono

La compensación individual se ha de considerar, sobre todo, cuando la potencia del motor es importante en relación a la potencia total de la instalación.

Precaución general

El factor de potencia de los motores es muy bajo en vacío o con poca carga; debemos procurar evitar trabajar en estas condiciones sin compensación.

Conexión

La batería se puede conectar a los bornes del motor.

Arranque

Si el motor arranca con ayuda de una aparatamenta especial (resistencia, inductancia, dispositivos estrella triángulo, autotransformador), la batería de condensadores no debe ser puesta en servicio hasta que termine el proceso de arranque.

Motores especiales

No es recomendable compensar los motores de paso a paso o de dos sentidos de marcha.

Regulación de las protecciones

La corriente aguas arriba (la) del motor es inferior con compensación que sin compensación, tal como se indica en la figura E4-011.

Puesto que la protección del motor se sitúa aguas arriba de la conexión motor batería, este fenómeno afecta las protecciones en relación a los factores de potencia, antes de la compensación y después de la compensación, disminuyendo la intensidad después de la compensación en la relación:

$$\frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'} \quad \blacksquare \quad \begin{array}{l} \cos \varphi \text{ antes de la compensación} \\ \cos \varphi' \text{ después de la compensación} \end{array}$$

Si compensamos los motores con los valores indicados en la tabla E4-009, podemos considerar los coeficientes de reducción indicados en la tabla E4-008.

Coeficientes de reducción de la intensidad de los motores en función de la compensación	
Velocidad (rpm)	Coefficiente de reducción
750	0,88
1.000	0,90
1.500	0,91
3.000	0,93

Tabla E4-008: coeficientes de reducción de la intensidad de un motor sin compensar, al momento de compensar, en función del factor de potencia.

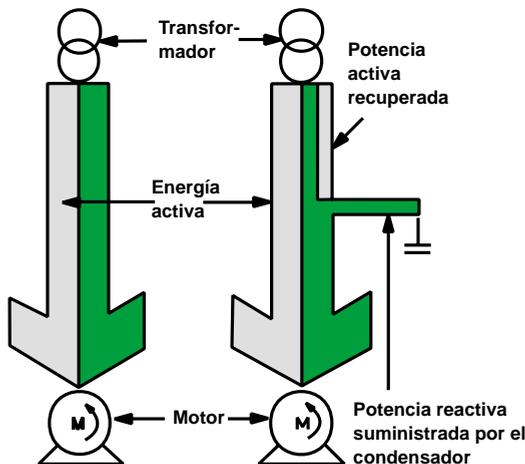


Fig. E4-007: a la izquierda, el transformador suministra toda la energía reactiva para el motor; a la derecha, la batería suministra parte de esta energía.

Cómo evitar la autoexcitación de los motores asíncronos

En el momento de instalar una batería de condensadores en los bornes de un motor, hemos de asegurarnos que la potencia de la batería es inferior a la potencia necesaria para la autoexcitación del motor.

Si un motor arrastra una carga con gran inercia (volante), puede suceder que después de un corte de la alimentación siga girando por la fuerza de la energía cinética y utilice la energía de la batería de condensadores para autoexcitarse y trabajar como un generador asíncrono. Esta actuación genera una sobretensión en la red, y a veces de valores importantes.

Para evitar este fenómeno, debemos asegurarnos que la potencia de la batería de condensadores es inferior a la autoexcitación propia del motor, asegurándonos que:

$$Q_c \leq 0,9 \cdot I_0 \cdot U_n \cdot \sqrt{3}$$

I_0 = corriente en vacío del motor.

La tabla E4-009 da los valores de Q_c , para una serie de motores, para evitar la autoexcitación.

Ejemplo:

Para un motor de 75 kW a 3000 rpm, la tabla E4-009 indica que puede aceptar una batería de condensadores de una potencia máxima de 17 kVAr.

Máxima potencia a compensar en los motores trifásicos					
Potencia nominal		Potencia máxima en kVAr a instalar			
		Velocidad en rpm			
kW	ch	3.000	1.500	1.000	750
22	30	6	8	9	10
30	40	7,5	10	11	12,5
37	50	9	11	12,5	16
45	60	11	13	14	17
55	75	13	17	18	21
75	100	17	22	25	28
90	125	20	25	27	30
110	150	24	29	33	37
132	180	31	36	38	43
160	218	35	41	44	52
200	274	43	47	53	61
250	340	52	57	63	71
280	380	57	63	70	79
355	482	67	76	86	98
400	544	78	82	97	106
450	610	87	93	107	117

Tabla E4-009: potencia máxima en kVAr a instalar, en la compensación individual de un motor asíncrono, sin provocar la autoexcitación.

Esta potencia es generalmente insuficiente para crear una autoexcitación y para compensar toda la energía reactiva que necesita.

Si queremos compensar hasta valores de $\cos \varphi$ que mejoren nuestra economía, deberemos compensar en cabecera de la instalación o del cuadro de distribución.

Motores de gran inercia

En toda instalación suelen encontrarse motores con grandes inercias; será conveniente que la aparatada de mando de las baterías de condensadores corten toda posible conexión eléctrica con estos motores, en un fallo general de suministro.

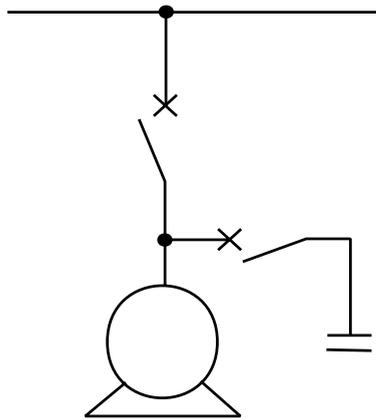


Fig. E4-010: esquema de conexionado de una batería de condensadores a un motor asíncrono.

4.6. Cuándo realizar una compensación automática

Esquema de principio de una batería automática

Los elementos internos

Un equipo de compensación automático debe ser capaz de adecuarse a las variaciones de potencia de reactiva de la instalación para conseguir mantener el $\cos \varphi$ predeterminado de la instalación.

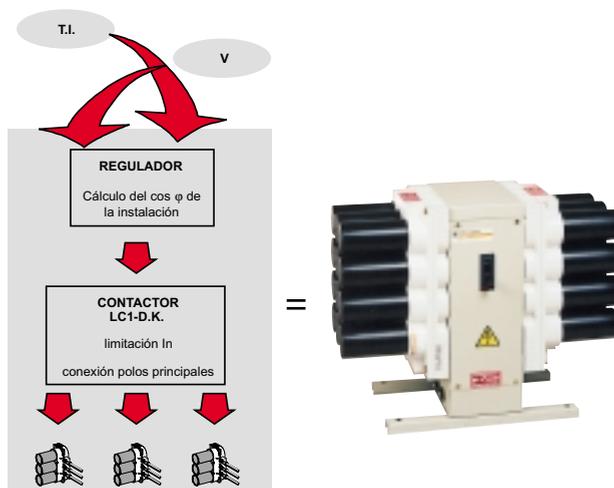


Fig. E4-011: esquema de principio de un equipo de compensación automática.

Un equipo de compensación automático está constituido por tres elementos principales:

■ El regulador.

Su función es medir el $\cos \varphi$ de la instalación y dar las órdenes a los contactores para intentar aproximarse lo más posible al $\cos \varphi$ deseado, conectando los distintos escalones de potencia reactiva. Además de esta función, los actuales reguladores Varlogic de Merlin Gerin incorporan funciones complementarias de ayuda al mantenimiento y la instalación.

Existen dos modelos de reguladores Varlogic atendiendo al número de salidas:

- de 1 hasta 6 escalones,
- de 1 hasta 12 escalones.

■ Los contactores.

Son los elementos encargados de conectar los distintos condensadores que configuran la batería. El número de escalones que es posible disponer en un equipo de compensación automático depende de las salidas que tenga el regulador.

■ Los condensadores.

Son los elementos que aportan la energía reactiva a la instalación. Normalmente la conexión interna de los mismos está hecha en triángulo.

Los elementos externos

Para el funcionamiento de un equipo de compensación automático es necesaria la toma de datos de la instalación; son los elementos externos que permiten actuar correctamente al equipo:

■ La lectura de intensidad.

Se debe conectar un transformador de intensidad que lea el consumo de la totalidad de la instalación.

■ La lectura de tensión.

Normalmente se incorpora en la propia batería, de manera que al efectuar la conexión de potencia de la misma ya se obtiene este valor.

Esta información de la instalación (tensión e intensidad) le permite al regulador efectuar, en todo momento, el cálculo del $\cos \varphi$ existente en la instalación y le capacita para tomar la decisión de conectar o desconectar escalones (grupos) de condensadores.

■ También es necesaria la alimentación a 230 V para el circuito de mando de la batería. Las baterías incorporan unos bornes denominados "a, b" para este efecto.

Cómo instalar las baterías

En la compensación de un solo embarrado con una sola alimentación

■ Generalidades.

Una instalación en la que haya un único embarrado de BT es de lo más usual. La compensación se realiza para la totalidad de los receptores de la instalación y en el primario del transformador de intensidad debe circular toda la potencia de la instalación. Su amperaje será función de la potencia de la instalación; es normal considerar el mismo valor del interruptor automático general.

■ Precauciones en la instalación.

Como se ha dicho anteriormente, es necesario realizar la instalación complementaria de un transformador de intensidad que "lea" el consumo total de la instalación.

Es indispensable la correcta ubicación del TI según la fig. E4-012; la instalación del transformador en los puntos indicados con una aspa no es correcta.

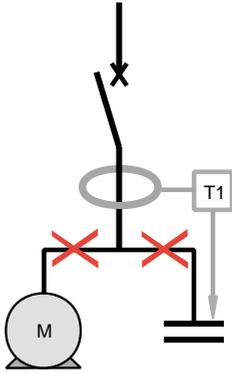


Fig. E4-012: esquema de conexión a un único embarrado de BT y ubicación del TI.

La compensación en varios embarrados:

■ Embarrados independientes en BT.

Otra posible instalación es la que dispone de varios embarrados independientes, que no tienen por qué estar conectados a dos transformadores idénticos.

Por este motivo, la necesidad de potencia reactiva será distinta para cada embarrado y se deberá evaluar separadamente, con los métodos anteriormente definidos.

La compensación se realizará para la totalidad de los receptores de la instalación y el amperaje de los transformadores de intensidad; para cada embarrado se determinará independientemente en función del total de la intensidad que atraviesa cada interruptor automático general de protección.

■ Precauciones de instalación.

Análogamente al caso anterior, la ubicación de cada TI se deberá realizar de la misma forma, para que lean ambos transformadores el consumo de cada parte de la instalación separadamente.

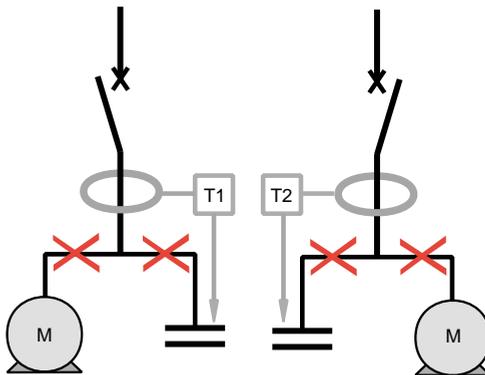


Fig. E4-013: esquema de conexión a varios embarrados de BT, independientes, y ubicación del TI.

La compensación en un embarrado alimentado por varios transformadores

Una instalación diferente a las anteriores es la que dispone de varios transformadores conectados en paralelo en el lado de BT:

■ Transformadores de distribución distintos.

La compensación de esta instalación se puede realizar con la colocación de dos baterías automáticas con sus respectivos TI.

■ Transformadores de distribución iguales.

En este caso se puede compensar con un única batería, cuyo regulador está alimentado por los transformadores de intensidad individuales a través de un sumador vectorial de las señales de los transformadores de intensidad.

El número máximo de entradas de los sumadores vectoriales es de 5.

■ Precauciones de instalación:

□ Transformadores de distribución distintos.

Cada batería es alimentada por un TI distinto conectado a la salida de cada transformador.

Tanto los ajustes como la instalación se deben considerar como si fueran dos embarrados independientes.

□ Transformadores de distribución iguales.

Si se realiza la compensación con una única batería, la única precaución es: en el momento de realizar la puesta en marcha, la relación C/K, que se debe programar en el regulador, debe considerar la suma de todos los TI que alimentan al sumador.

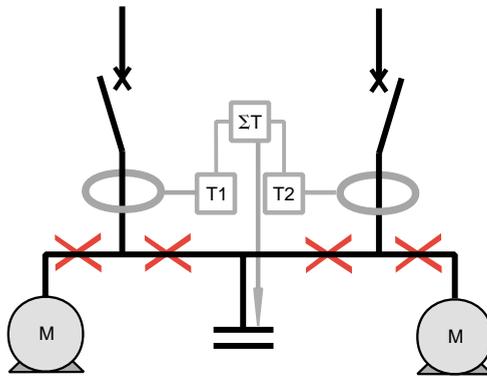


Fig. E4-014: esquema de conexión a varios transformadores en paralelo y ubicación del TI.

El concepto de la regulación

Regulación física y eléctrica

■ Definición de una batería automática.

Los tres parámetros que definen una batería automática son:

- la potencia en kVAR, que vendrá dada por los cálculos y dependerá del $\cos \varphi$ inicial y el deseado,
- la tensión nominal de la batería, que siempre deberá ser igual o mayor a la de la red,
- la regulación de la batería, que indicará el escalonamiento físico de la misma.

■ Regulación física.

El escalonamiento o regulación física de una batería automática indica:

- la composición,
- el número,
- la potencia

de cada uno de los conjuntos de condensadores que forman los escalones. Normalmente se suele expresar la potencia del primer escalón con base y la de los demás escalones, iguales, doble o triple de la base.

Ejemplos:

- Batería de 70 kVAR, formada por los siguientes escalones de potencias: 10 + 20 + 20 + 20, tiene una regulación 1.2.2.2, ya que el primer escalón se toma de base y los demás escalones tienen doble potencia.

– Batería de 70 kVAr, formada por los siguientes escalones de potencias:
7 escalones de 10 kVAr, tendría una regulación 1.1.1.1 (se suele indicar con cuatro cifras representativas, no se indican los siete escalones).
Obsérvese en la fig. E4-015 la actuación de las dos baterías; prácticamente es la misma a pesar de tener dos configuraciones distintas.

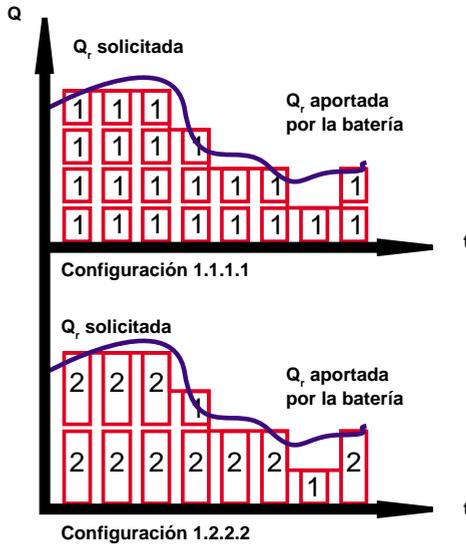


Fig. E4-015: escalonamientos 1.1.1.1 y 1.2.2.2.

■ Regulación eléctrica.

Realmente, el parámetro que marca la diferencia de actuación de una batería es su regulación eléctrica.

En el ejemplo anterior la regulación eléctrica de ambas baterías es la misma (7×10), indica que ambas baterías van a actuar con una regulación mínima de 10 kVAr.

■ Una batería bien elegida.

□ Desde el punto de vista del precio del equipo.

Cuanto más escalones físicos tiene la batería, mayor precio, puesto que aumenta el número de conjuntos condensador-contactor y el tamaño de la envolvente.

□ Desde el punto de vista de la adaptación al $\cos \varphi$ deseado.

Cuanto menor sea el escalón base, mejor se podrá ajustar a la variación de demanda de la energía reactiva.

Por tanto, en una batería bien elegida debe existir un equilibrio entre la regulación eléctrica y la física.

Los reguladores Varlogic permiten hasta 7 regulaciones distintas, con lo que optimizan el coste del equipo proporcionando un máximo de aproximación a las solicitudes de potencia reactiva.

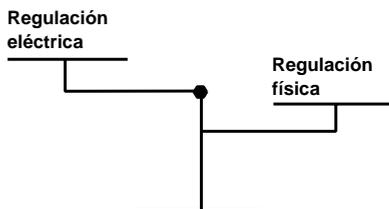


Fig. E4-016: en una batería bien elegida debe existir un equilibrio entre la regulación eléctrica y la física.

Ejemplo:

Una batería de 70 kVAr formada por escalones de potencias 10 + 20 + 40, regulación 1.2.4, proporciona una regulación eléctrica igual a la del ejemplo anterior, con un menor precio que la de 7 · 10, puesto que con sólo tres conjuntos de contactor-condensador se soluciona la compensación.

El regulador

La programación de un regulador

Los datos que se deben programar en un regulador al realizar la puesta en marcha son los siguientes:

- El $\cos \varphi$ deseado en la instalación.
- La relación C/K.

Estos datos son únicos para cada instalación y no se pueden programar de fábrica.

¿Qué es el C/K?

El regulador es el componente que decide la entrada o salida de los escalones, en función de la potencia reactiva utilizada en aquel momento en la instalación.

- Para esta función utiliza tres parámetros:

el $\cos \varphi$ deseado,

el $\cos \varphi$ que existe en cada momento en la instalación,

la intensidad del primer escalón, que es el que marca la regulación mínima de la batería.

- La toma de la señal de la intensidad se realiza siempre a través de un transformador de intensidad X/5.

■ Para que el regulador pueda conectar un escalón u otro, ha de conocer la potencia de cada escalón y consecuentemente su intensidad. La señal permanente, recibida del transformador de intensidad, le permite conocer las necesidades de cada momento.

- La acomodación de esta necesidad a la conexión de escalones se realiza por medio de una relación, que llamamos C/K, introducida como un parámetro en el regulador.

El valor del C/K se obtiene de la fórmula siguiente:

$$C/K = \frac{Q_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot R_{T1}}$$

de donde:

Q_1 = potencia del primer escalón, escalón base (VAr).

U = tensión de la red (V).

R_{T1} = relación de transformación del transformador de intensidad.

Ejemplo:

Batería de 70 kVAr, formada por los siguientes escalones de potencias: 10 + 20 + 40.

Se conecta en una instalación donde el interruptor automático general de protección es de 630 A.

El transformador de intensidad es de 700/5.

El C/K será:

$$C/K = \frac{Q_1}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{(10 \cdot 1000) \text{ VAr}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = \frac{700 \text{ A/5 A}}{700 \text{ A/5 A}} = 0,10$$

La importancia del ajuste del C/K

Para comprender la importancia del ajuste del C/K, tenemos que entender que cada batería tiene su propio escalón base.

Por tanto, la batería sólo podrá ajustar su potencia a la potencia solicitada, en función del $\cos \varphi$ deseado, cuando ésta tenga un valor igual o múltiplo del escalón base.

Ejemplo:

Batería de 70 kVAr, formada por los siguientes escalones: 10 + 20 + 40.

El $\cos \varphi$ deseado y programado en el regulador es de 1.

Los datos facilitados por el transformador de intensidad, en un momento determinado, deducen:

$P = 154 \text{ kW}$

$\cos \varphi = 0,97$

Esta deducción por cálculo, efectuada por el regulador, le indica:

$$Q = P (\text{tg} \varphi_{\text{inicial}} - \text{tg} \varphi_{\text{deseado}}) = 154 \text{ kW} (0,25 - 0) = 38,5 \text{ kVAr}$$

Como que el escalonamiento de la batería es de $7 \cdot 10 \text{ kVAr}$, la batería estaría constantemente fluctuando entre 30 y 40 kVAr.

Para evitar esta fluctuación existe la regulación C/K.

Interpretación del ajuste C/K

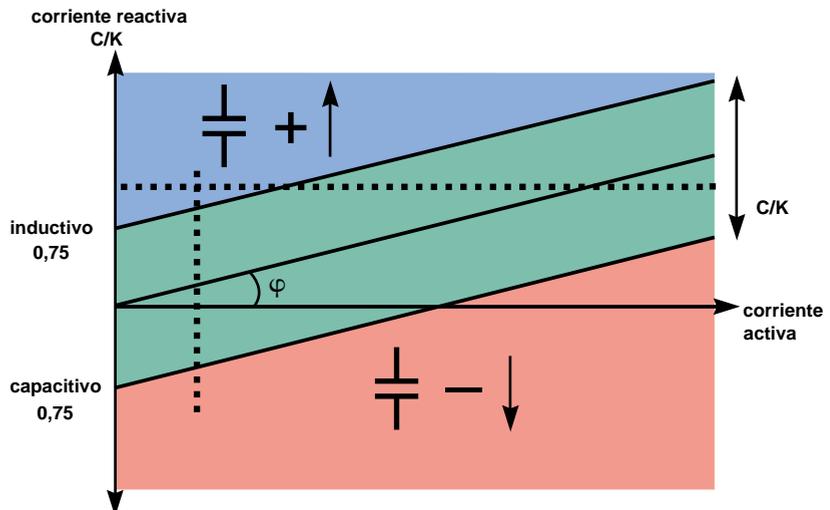


Fig. E4-017: interpretación del ajuste C/K en un regulador de energía reactiva.

En la fig. E4-017 está representado el significado del ajuste C/K.

■ El eje de las abscisas (X) representa la intensidad activa de la instalación, y

el eje de las ordenadas (Y) representa la intensidad reactiva:

□ Inductiva (la que solicita la instalación) en el semiplano positivo.

- Capacitiva (la que aporta la batería) en el semiplano negativo.
- Se puede representar en este gráfico cualquier situación del $\cos \varphi$ en la instalación, como las coordenadas de un punto (X,Y), atendiendo a las componentes de la intensidad activa y reactiva.
- Se representa una franja, con pendiente análoga a la tangente del ángulo correspondiente al $\cos \varphi$ deseado y la anchura de la banda responde a la regulación del C/K.
- Cuando la solicitud de potencia reactiva caiga en un valor comprendido dentro la franja del C/K, el regulador no dará una nueva orden de conexión o desconexión, pero si supera el valor de la franja sí; en la parte superior conectará un escalón, y si es por la parte inferior desconectará un escalón.
- Esta franja da un espacio de estabilidad, en detrimento de un ajuste preciso del $\cos \varphi$, pero evita un desgaste excesivo de los contactores y los inconvenientes de las puntas de conexión, dando tiempo a realizar la descarga de los condensadores en las desconexiones.
- Un ajuste demasiado bajo del C/K (banda muy estrecha) implica un sobretrabajo inútil de los contactores.
- Un ajuste demasiado alto (banda muy ancha) implica un defecto de ajuste del $\cos \varphi$ deseado y una excesiva estabilidad de los contactores; por tanto, la regulación del C/K tiene un valor óptimo que corresponde a la fórmula anteriormente descrita.
- Los reguladores proporcionan la posibilidad de ajuste automático del C/K bajo cualquier condición de carga de la instalación.
El ajuste manual permite la introducción de valores desde 0,01 hasta 1,99, pudiéndose visualizar en pantalla el valor ajustado.

5. ¿Cómo determinar el nivel de compensación de la energía reactiva?

5.1. Métodos de cálculo

Balance de potencias, determinación de la potencia reactiva (a la concepción)

La determinación se puede realizar de la misma forma que se realiza para la potencia activa (descrita en el capítulo B).

En el apartado 3 del capítulo B se dan los valores de la potencia activa y el factor de potencia de la mayoría de las cargas, así es posible determinar la potencia activa y reactiva, siguiendo el mismo proceso de forma pareja.

Una vez efectuado el análisis de potencias tendremos unas potencias y unos factores de potencia; efectuando la media tendremos una potencia total y factor de potencia medio.

Ejemplo:

Balance de potencias de una instalación

Potencias (kW)	cos φ	P · cos φ
20	0,65	20 · 0,65 = 13
15	0,60	15 · 0,60 = 9
60	0,80	60 · 0,80 = 48
5	1	5 · 1 = 5
$\Sigma = 100$		$\Sigma = 75$

Tabla E5-001: tabla de análisis de potencias y factores de potencia.

El cos φ medio de la instalación es de 0,75; si deseamos compensarlo hasta 0,95 podemos buscar en la tabla E5-003 el factor correspondiente a:

$$\cos \varphi = \frac{\Sigma(P \cdot \cos \varphi)}{\Sigma P} = \frac{75}{100} = 0,75$$

cos φ inicial = 0,75

cos φ compensado hasta = 0,95

Factor = 0,553

■ La potencia de la batería en kVAr será:

$$Q_c = 100 \text{ kW} \cdot 0,553 = 55,$$

Balance de consumos a partir de la facturación de la empresa suministradora, optimización técnico-económica (para una instalación existente)

Para determinar la potencia óptima de la batería de condensadores

Debemos tener en cuenta los siguientes elementos:

- Facturas de la energía consumida durante un ciclo completo, aconsejable 12 meses.
- Costes correspondientes a la compra e instalación de la batería.

Ejemplo:

Datos factura de energía			Tarifa 3.0
Tipo	Consumo	Término de potencia	Importe
		390 · 1,35	525,04
Activa	24640	Término de energía	
		35540 · 0,08	2.770,38
		Recargos	
Punta	10900	12,26 %	339,87
Reactiva	39400	16,90 %	556,93
		Tributos	
		Canon	

Tabla E5-002: tabla de valores de los conceptos de un recibo de energía.

Comprobación del recibo:

■ Comprobación de las lecturas de los contadores.

■ Comprobación del recargo por reactiva:

□ Comprobación del $\cos \varphi$.

La $\operatorname{tg} \varphi$ será:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\text{kVAr}}{\text{kW}} = \frac{39.400}{35.540} = 1,1086$$

A esta $\operatorname{tg} \varphi$ le corresponde un $\cos \varphi$ de 0,6705.

□ Comprobación del factor de recargo:

$$K_r = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21 = \frac{17}{0,6705^2} - 21 = 16,82 \%$$

En el recibo se ha redondeado por exceso a 16,9.

□ Comprobación del importe del recargo por energía reactiva:

Término de potencia = 525,04 €

Término de energía = 2.770,38 €

$$\text{Recargo} = \frac{(525,04 + 2.770,38) 16,9}{100} = 556,93 \text{ €}$$

La diferencia de 556,93 € a los 896,79 es el recargo por horas punta.

■ Cálculo de la potencia.

Los consumos por horas normales y horas punta nos indican los kilovatios consumidos durante el período de lectura.

Si los períodos de lectura son mensuales y los días de trabajo al mes son 22 y las horas de trabajo son 8 diarias, tendremos que la lectura de los kW/h corresponden a:

$$\text{Horas} = 22 \text{ días} \cdot 8 \text{ h/día} =$$

Las lecturas nos dan kW/h, la potencia corresponde a kW, por tanto la potencia media del abonado es de:

$$P(\text{kW}) = \frac{\text{consumo (kW/h)}}{\text{horas}} = \frac{35.540}{176} = 202 \text{ kW}$$

5. ¿Cómo determinar el nivel de compensación de la energía reactiva?

Antes de compensar		Potencia del condensador (en kVAr) a instalar por kW de carga, para compensar el $\cos \varphi$ de origen hasta un valor deseado												
tg φ	cos φ													
	0,75	0,59	0,48	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,29	0,25	0,20	0,14	0,0	
0,40	1,557	1,691	1,805	1,832	1,861	1,895	1,924	1,959	1,998	2,037	2,085	2,146	2,288	
0,41	1,474	1,625	1,742	1,769	1,798	1,831	1,840	1,896	1,935	1,973	2,021	2,082	2,225	
0,42	1,413	1,561	1,681	1,709	1,738	1,771	1,800	1,836	1,874	1,913	1,961	2,022	2,164	
0,43	1,356	1,499	1,624	1,651	1,680	1,713	1,742	1,778	1,816	1,855	1,903	1,964	2,107	
0,44	1,290	1,441	1,558	1,585	1,614	1,647	1,677	1,712	1,751	1,790	1,837	1,899	2,041	
0,45	1,230	1,384	1,501	1,532	1,561	1,592	1,628	1,659	1,695	1,737	1,784	1,846	1,988	
0,46	1,179	1,330	1,446	1,473	1,502	1,533	1,567	1,600	1,636	1,677	1,725	1,786	1,929	
0,47	1,130	1,278	1,397	1,425	1,454	1,485	1,519	1,532	1,588	1,629	1,677	1,758	1,881	
0,48	1,076	1,228	1,297	1,370	1,400	1,430	1,464	1,497	1,534	1,575	1,623	1,684	1,826	
0,49	1,030	1,179	1,248	1,326	1,355	1,386	1,420	1,453	1,489	1,530	1,578	1,639	1,782	
0,50	0,982	1,232	1,202	1,276	1,303	1,337	1,369	1,403	1,441	1,481	1,529	1,590	1,732	
0,51	0,936	1,087	1,160	1,230	1,257	1,291	1,323	1,357	1,395	1,435	1,483	1,544	1,686	
0,52	0,894	1,043	1,116	1,188	1,215	1,249	1,281	1,315	1,353	1,393	1,441	1,502	1,644	
0,53	0,850	1,000	1,075	1,144	1,171	1,205	1,237	1,271	1,309	1,349	1,397	1,458	1,600	
0,54	0,809	0,959	1,035	1,103	1,130	1,164	1,196	1,230	1,268	1,308	1,356	1,417	1,559	
0,55	0,769	0,918	0,996	1,063	1,090	1,124	1,156	1,190	1,228	1,268	1,316	1,377	1,519	
0,56	0,730	0,879	0,958	1,024	1,051	1,085	1,117	1,151	1,189	1,229	1,277	1,338	1,480	
0,57	0,692	0,841	0,921	0,986	1,013	1,047	1,079	1,113	1,151	1,191	1,239	1,300	1,442	
0,58	0,665	0,805	0,884	0,949	0,976	1,010	1,042	1,076	1,114	1,154	1,202	1,263	1,405	
0,59	0,618	0,768	0,849	0,912	0,939	0,973	1,005	1,039	1,077	1,117	1,165	1,226	1,368	
0,60	0,584	0,733	0,815	0,878	0,905	0,939	0,971	1,005	1,043	1,083	1,131	1,192	1,334	
0,61	0,549	0,699	0,781	0,843	0,870	0,904	0,936	0,970	1,008	1,048	1,096	1,157	1,299	
0,62	0,515	0,665	0,749	0,809	0,836	0,870	0,902	0,936	0,974	1,014	1,062	1,123	1,265	
0,63	0,483	0,633	0,716	0,777	0,804	0,838	0,870	0,904	0,942	0,982	1,030	1,091	1,233	
0,64	0,450	0,601	0,685	0,744	0,771	0,805	0,837	0,871	0,909	0,949	0,997	1,058	1,200	
0,65	0,419	0,569	0,654	0,713	0,740	0,774	0,806	0,840	0,878	0,918	0,966	1,007	1,169	
0,66	0,388	0,538	0,624	0,682	0,709	0,743	0,775	0,809	0,847	0,887	0,935	0,996	1,138	
0,67	0,358	0,508	0,595	0,652	0,679	0,713	0,745	0,779	0,817	0,857	0,905	0,966	1,108	
0,68	0,329	0,478	0,565	0,623	0,650	0,684	0,716	0,750	0,788	0,828	0,876	0,937	1,079	
0,69	0,299	0,449	0,536	0,593	0,620	0,654	0,686	0,720	0,758	0,798	0,840	0,907	1,049	
0,70	0,270	0,420	0,508	0,564	0,591	0,625	0,657	0,691	0,729	0,769	0,811	0,878	1,020	
0,71	0,242	0,392	0,479	0,536	0,563	0,597	0,629	0,663	0,701	0,741	0,783	0,850	0,992	
0,72	0,213	0,364	0,452	0,507	0,534	0,568	0,600	0,634	0,672	0,712	0,754	0,821	0,963	
0,73	0,186	0,336	0,425	0,480	0,507	0,541	0,573	0,607	0,645	0,685	0,727	0,794	0,936	
0,74	0,159	0,309	0,398	0,453	0,480	0,514	0,546	0,580	0,618	0,658	0,700	0,767	0,909	
0,75	0,132	0,282	0,371	0,426	0,453	0,487	0,519	0,553	0,591	0,631	0,673	0,740	0,882	
0,76	0,105	0,255	0,345	0,399	0,426	0,460	0,492	0,526	0,564	0,604	0,652	0,713	0,855	
0,77	0,079	0,229	0,319	0,373	0,400	0,434	0,466	0,500	0,538	0,578	0,620	0,687	0,829	
0,78	0,053	0,202	0,292	0,347	0,374	0,408	0,440	0,474	0,512	0,552	0,594	0,661	0,803	
0,79	0,026	0,176	0,266	0,320	0,347	0,381	0,413	0,447	0,485	0,525	0,567	0,634	0,776	
0,80		0,150	0,240	0,294	0,321	0,355	0,387	0,421	0,459	0,499	0,541	0,608	0,750	
0,81		0,124	0,214	0,268	0,295	0,329	0,361	0,395	0,433	0,473	0,515	0,582	0,724	
0,82		0,090	0,188	0,242	0,269	0,303	0,335	0,369	0,407	0,447	0,489	0,556	0,698	
0,83		0,072	0,162	0,216	0,243	0,277	0,309	0,343	0,381	0,421	0,463	0,530	0,672	
0,84		0,046	0,136	0,190	0,217	0,251	0,283	0,317	0,355	0,395	0,437	0,504	0,645	
0,85		0,020	0,109	0,164	0,191	0,225	0,257	0,291	0,329	0,369	0,417	0,478	0,620	
0,86			0,083	0,140	0,167	0,198	0,230	0,264	0,301	0,343	0,390	0,450	0,593	
0,87			0,054	0,114	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,317	0,364	0,424	0,567	
0,88			0,028	0,085	0,112	0,143	0,175	0,209	0,246	0,288	0,335	0,395	0,538	
0,89				0,059	0,086	0,117	0,149	0,183	0,230	0,262	0,309	0,369	0,512	
0,90				0,031	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,234	0,281	0,341	0,484	

Tabla E5-003: coeficientes para calcular la potencia de la batería en VAR, en función del factor de potencia inicial y el deseado (final).

■ Cálculo de la potencia de la batería.

Si deseamos pasar a un $\cos \varphi$ de 0,98, el coeficiente de la tabla E5-003, para pasar del $\cos \varphi$ de 0,6705, es de 0,905:

$$Q_c \text{ (kVAr)} = P \text{ (kW)} \cdot 0,905 = 202 \cdot 0,905 = 183 \text{ kVAr}$$

■ Elección de la batería.

Una Rectimat de 180 kVAr a 400 V tiene un valor de compra (tarifa) de 5.624,57 €.

■ Comprobación de recargo:

$$K_r = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21 = \frac{17}{0,98^2} - 21 = -3,3$$

Representa una bonificación del 3,3%

La reducción por la compensación será:

□ Para el mismo consumo:

Término de potencia = 525,04 €

Término de energía = 2.770,38 €

Total = 3.295,43 €

Bonificación = 3.295,43 · 3,3% = 108,75 €

□ La diferencia total corresponde a la anulación del recargo y a la obtención del abono:

Recargo = 556,93 €

Abono = 108,75 €

Total = 665,68 €

■ Amortización:

$$\text{Amortización} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Reducción}} = \frac{5.624,57}{665,68} = 8,5 \text{ meses}$$

5.2. Dimensionado de una batería de condensadores en presencia de armónicos

Problemas presentados por los armónicos

Los equipos generadores de armónicos son aquellos que, integrados por cargas lineales, son capaces de oscilar por sí mismos a una frecuencia propia, no senoidal, en función de la capacitancia e inductancia acopladas a la oscilación; por tanto, existen diversas oscilaciones y en consecuencia diversas frecuencias de oscilación.

Elementos no generadores de armónicos

En términos generales se considera que las cargas lineales no crean armónicos, resistencias, inductancias, condensadores...

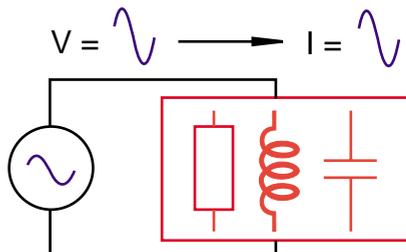


Fig. E5-004: cargas lineales que no generan armónicos.

Elementos generadores de armónicos

Las cargas no lineales son susceptibles de oscilar y por tanto de crear armónicos, tales como los circuitos de electrónica de potencia, variadores de velocidad, rectificadores estáticos, convertidores, etc. Los equipos con reactancias saturadas, equipos de soldadura, hornos de arco..., también son generadores de armónicos.

Efectos de los armónicos sobre los condensadores

Los armónicos perturban el funcionamiento de numerosas máquinas y equipos electrónicos. Los condensadores, en particular, son muy sensibles a los armónicos por el hecho de que su impedancia decrece en función de la frecuencia del armónico, facilitando puntos de perforación.

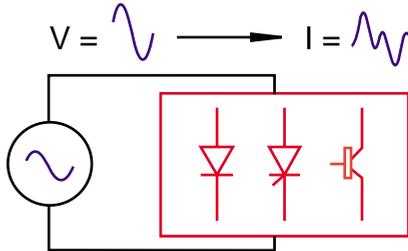


Fig. E5-005: las cargas no lineales que son capaces de crear armónicos.

Si la conexión a la red del condensador está próxima a un generador de armónicos, puede producirse una oscilación que entre en resonancia, amplificando así la oscilación.

En estas circunstancias, la corriente resultante calentará excesivamente al condensador y puede producir perforaciones en el mismo.

Un cierto número de soluciones permiten limitar las consecuencias de los armónicos, facilitando un buen funcionamiento de los condensadores.

Será necesario realizar un análisis de la coexistencia de los generadores de armónicos y los condensadores, instalados en un mismo circuito, para que no entren dentro del campo de las corrientes parásitas capaces de distorsionar el buen funcionamiento de los condensadores.

Generadores de armónicos		
Tipo de carga	Armónicos generados	Comentarios
Transformador	Orden par e impar	Componentes en cc
Motor asíncrono	Orden impar	Inter y subarmónicos
Lámpara de descarga Tubos fluorescentes	3º + impares	Puede llegar al 30% de I_1
Soldadura por arco	3º	
Hornos de arco CA	Espectro variable inestable	No lineal-asimétrico
Rectificadores con filtro inductivo	$H = K \cdot P + 1$	SAI-variadores de velocidad
Rectificadores con filtro capacitivo	$I_h = I_1/h$	Alimentación equipos electrónicos
Cicloconvertidores	Variables	Variadores de velocidad
Reguladores PWM		SAI-convertidores cc-ca

Tabla E5-006: consideraciones sobre los generadores más usuales de armónicos, en los circuitos eléctricos de distribución.

Soluciones posibles

La toma en consideración de los fenómenos de los armónicos consiste, generalmente, en sobredimensionar las baterías de condensadores y/o instalar conjuntos de inductancia condensador para filtrar frecuencias superiores a 50 Hz.

Contra los efectos de los armónicos

La presencia de armónicos produce un aumento de la intensidad eficaz.

Por ello toda la aparatenta y conductores serán dimensionados de 1,3 a 1,5 veces la intensidad nominal del circuito.

Contra los fenómenos de resonancia

Los condensadores no son generadores de armónicos, pero la presencia de un condensador, en una red con generadores de armónicos y en función de la configuración de la instalación, puede provocar una amplificación del armónico.

Este hecho se da cuando la frecuencia de resonancia paralela del sistema esté próxima a la frecuencia de los armónicos generados.

Esta frecuencia es función de la impedancia de la red y consecuentemente de la potencia de cortocircuito.

El valor de la frecuencia de resonancia de la instalación, en bornes del condensador, estará muy próxima a:

$$f_r = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

S_{cc} = potencia de cortocircuito de la red en kVA.

Q = potencia de la batería de condensadores en kVAR.

Si el rango de los armónicos generados próximos a los bornes de la batería se asemeja a los valores de la frecuencia de resonancia, en este punto se producirá la amplificación.

La intensidad se elevará y podrá provocar perforaciones al dieléctrico del condensador o simplemente envejecimiento del mismo. Para paliar este fenómeno podemos utilizar:

■ Condensadores sobredimensionados dieléctricamente (en tensión), por ejemplo para redes de 400 V, inductancias de 470 V.

■ Bobinas (self), antiarmónicas, conectadas en serie con los condensadores y sintonizadas a 190 Hz para redes de 50 Hz y a 228 Hz para redes de 60 Hz.

Son adecuadas para reducir las tensiones y las intensidades de los armónicos (de rangos más comunes), en los bornes de conexión del condensador.

Elección de soluciones

La elección de soluciones se realiza a partir de:

■ ΣR (Gh): *la potencia en kVA de todos los generadores de armónicos.*

■ S_n : *potencia del o de los transformadores aguas arriba (en kVA).*

Elementos a tener en consideración

La elección se realiza a partir de la toma en consideración de los siguientes elementos:

■ $\Sigma(R)$ (Gh) = potencia en kVA de todos los generadores de armónicos (convertidores estáticos, onduladores, variadores de velocidad...) alimentados desde el mismo juego de barras que los condensadores.

- Si la potencia de los generadores es conocida en kW en vez de kVA, deberemos dividir los kW por un factor de potencia medio de $\cos \varphi = 0,7$ para obtener la verdadera $\Sigma(R)$ (Gh) de potencias.
- Si de varios transformadores que están en paralelo se deja fuera de servicio uno de ellos, comporta una disminución de la potencia (S_n) y de la potencia de cortocircuito (S_{cc}).

Los filtros pasivos:

- La resonancia serie.

La resonancia serie aparece con la conexión serie de reactancia inductiva y una capacitiva.

Existirá una determinada frecuencia que disminuirá, de forma importante, la impedancia del conjunto L-C serie.

Este fenómeno es utilizado para filtrar los armónicos en una instalación y se denomina resonancia serie.

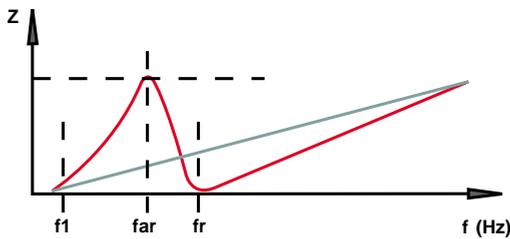


Fig. E5-007: curva de impedancias en función de la frecuencia para una instalación que incorpora equipos SAH ($f_r = 190$ Hz).

- Las soluciones de Schneider Electric:

- Equipos clase "H".

Toda la oferta de Schneider Electric de equipos de compensación en BT incorpora la gama clase "H", que utiliza condensadores sobredimensionados en tensión.

Con los equipos clase "H" no se reduce la distorsión armónica ni se evita la amplificación, únicamente se protegen los condensadores de las sobretensiones armónicas que pueden existir en la instalación.

- Equipos SAH.

Cuando a la necesidad de compensar se une la necesidad de filtrar, debido a que la amplificación de los armónicos existentes es demasiado elevada, se recomienda la instalación de equipos SAH.

Estos equipos evitan la amplificación y protegen a los condensadores de las sobretensiones armónicas.

Los equipos SAH son equipos L-C sintonizados a una frecuencia de resonancia serie de 190 Hz, y provocan el desplazamiento de la frecuencia de resonancia paralela fuera del espectro armónico, evitando de esta forma la amplificación.

- Filtros sintonizados.

Utilizando la misma característica de la frecuencia de resonancia serie, los filtros sintonizados presentan una frecuencia de resonancia serie para cada uno de los armónicos que se pretenda filtrar.

De tal forma que un equipo de estas características presenta tantos escalones como frecuencias de sintonía se pretenda disponer.

- Existen otros tipos de filtros en función de las necesidades de cada instalación, como pueden ser los filtros amortiguadores de 2.º o 3.º orden, que además de filtrar los armónicos de su propia frecuencia de sintonización amortiguan los de frecuencias superiores.

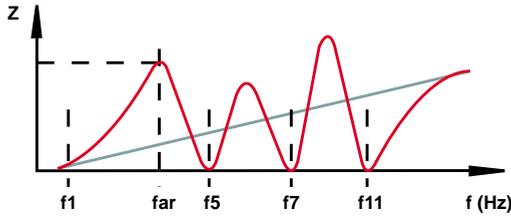


Fig. E5-008: curva de impedancias en función de la frecuencia para una instalación que incorpora un filtro sintonizando los armónicos n.ºs 5, 7 y 11.

Elección de una solución

A partir de estos elementos, la elección de una solución, limitando las consecuencias de los armónicos a un nivel aceptable para los condensadores, se define en la tabla E5-009.

Nota: En alguna publicación de Schneider Electric la suma de potencias generadoras de armónicos la denominan: $\Sigma R = Gh$

Tabla para la elección del proceso de cálculo de una batería para un circuito con armónicos

Condensadores alimentados en: BT por un transformador (regla general en función de su potencia)			
$\Sigma R = \frac{S_{cc}}{120}$	$\frac{S_{cc}}{120} \leq \Sigma R \leq \frac{S_{cc}}{70}$	$\Sigma R = \frac{S_{cc}}{70}$	
Condensadores estándar	Condensadores clase "H" (tensión sobredimensionada en un 10%)	Baterías de condensadores SAH (tensión sobredimensionada en un 10% + inductancia antiarmónicos)	
Condensadores alimentados en: BT por un transformador (regla simplificada utilizable si $S_n < 2$ MVA)			
$\Sigma R \leq 0,15 S_n$	$0,15 S_n < \Sigma R \leq 0,25 S_n$	$0,25 S_n \leq \Sigma R \leq 0,60 S_n$	$\Sigma R \geq 0,60 S_n$
Condensadores estándar	Condensadores clase "H" (tensión sobredimensionada en un 10%)	Baterías de condensadores SAH (tensión sobredimensionada en un 10% e inductancias en serie)	Filtro sintonizador

Tabla E5-009: tabla de elección de una batería, limitando el efecto de los armónicos.

Ejemplos:

Se eligen tres casos que muestran, respectivamente, situaciones en las que deben instalarse baterías de condensadores estándar, sobredimensionadas, y baterías SAH.

Ejemplo 1:

Potencia nominal del transformador = 500 kVA.
Tensión de cortocircuito (transformador) = 4%.
Suma de potencias creadoras de armónicos $\Sigma R = 50$ kVA.

$$S_{cc} = \frac{500 \cdot 100}{4} = 12.500 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{cc}}{120} = \frac{12.500}{120} = 104 \qquad \Sigma R = 50 \leq \frac{S_{cc}}{120}$$

Solución: utilizar condensadores estándar.

E
5

Ejemplo 2:

Potencia nominal del transformador = 1.000 kVA.

Tensión de cortocircuito (transformador) = 4%.

Suma de potencias creadoras de armónicos $\Sigma R = 250$ kVA.

$$S_{cc} = \frac{1.000 \cdot 100}{4} = 25.000 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{cc}}{120} = \frac{25.000}{120} = 208 \quad \frac{S_{cc}}{70} = \frac{25.000}{70} = 357$$

$$\Sigma R: 250 \text{ comprendido entre } \frac{S_{cc}}{120} \text{ y } \frac{S_{cc}}{70}$$

Solución: utilizar condensadores sobredimensionados a 440 V.

Ejemplo 3:

Potencia nominal del transformador = 630 kVA.

Tensión de cortocircuito (transformador) = 4%.

Suma de potencias creadoras de armónicos $\Sigma R = 250$ kVA.

$$S_{cc} = \frac{630 \cdot 100}{4} = 15.750 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{cc}}{70} = \frac{15.750}{70} = 225 \quad \Sigma R = 250 > \frac{S_{cc}}{70}$$

Solución: utilizar baterías de condensadores SAH (con condensadores sobredimensionados a 440 V e inductancias acopladas en serie y sintonizando el conjunto a 190 Hz).

Precauciones frente a los distribuidores de energía

El Reglamento de BT de 1973 no especifica ninguna instrucción sobre la materia, pero en Europa existen prescripciones al respecto; los datos expuestos corresponden a la reglamentación francesa.

Es necesario verificar la coexistencia de los condensadores y las cargas generadoras de armónicos, para que no entreguen a la red de suministro valores de distorsión superiores a los aceptados por la empresa suministradora de energía.

Las empresas suministradoras de energía pueden limitar la introducción de armónicos a su red.

El umbral general de armónicos aceptable se corresponderá a la relación entre el valor eficaz de los armónicos y el valor eficaz de la onda fundamental a frecuencia industrial (50 Hz).

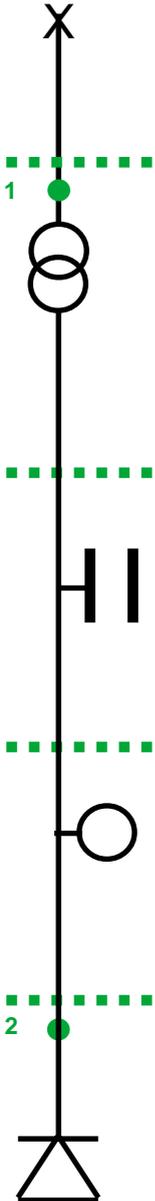
Es aconsejable que este valor no supere el 1,6%.

Esto nos conduce a limitar la distorsión, aguas abajo de los transformadores de MT/BT, a un 4 o 5%.

Si estos valores son superados, utilizaremos filtros en concordancia al rango de los armónicos presentes en mayoría.

Las soluciones planteadas para la reducción de armónicos son válidas.

Tabla para la realización de un preestudio de armónicos



Cliente
 Obra
 Datos de la red: Un kV
 Scc MVA Sí No
 Importación de armónicos:

Transformadores

Transfo 1	Transfo 2	Transfo 3	Transfo 4
Sn kVA	Sn kVA	Sn kVA	Sn kVA
U ₂ V			
Ucc %	Ucc %	Ucc %	Ucc %

Conexión de los secundarios en paralelo Sí No

Compensación de la energía reactiva

Existente Fija kVAr
 Automática kVAr
 SAH o filtros kVAr Hz
 A calcular cos φ deseado

Cargas no generadoras de armónicos

Datos nominales carga Pn kW cos φ
 Funcionamiento habitual carga:
 100% 75% 50% 25%
 Pn kW cos φ

Cargas generadoras de armónicos

Tipo Modelo Pn kW N.º
 Punto de medición: 1 2

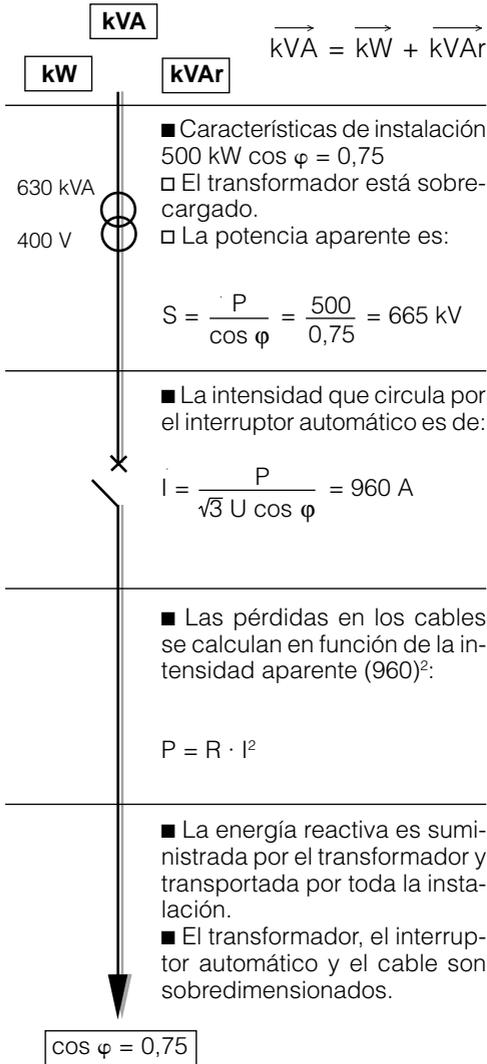
	h1	h3	h5	h7	h11	h13	h	h	h	h	Σ THD
In (A)											
Ih (%)											
Uh (%)											

E
5

5.3. Comparación de una instalación sin compensación con una con compensación

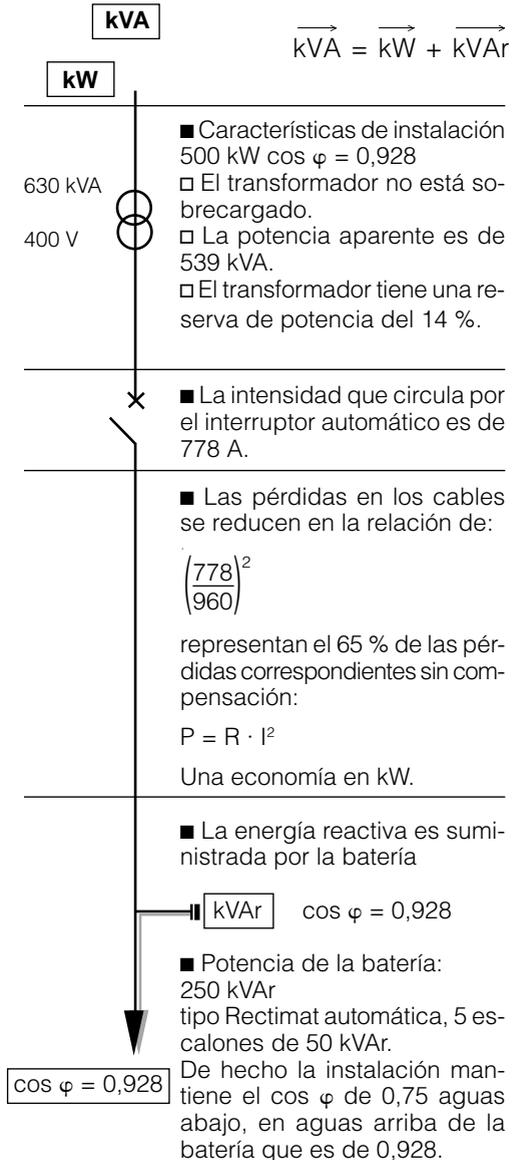
Instalaciones sin compensar:

- Los kVAr son facturados.
- La potencia aparente (kVA) es superior a la activa (kW).
- El consumo en kW es superior al incluir las pérdidas producidas por los kVAr.
- Las instalaciones son sobredimensionadas.



Instalaciones con compensación

- El consumo de kVAr es:
 - eliminado,
 - disminuido.
- La potencia solicitada en kVA se ajusta a la potencia activa kW.
- Los recargos:
 - se eliminan,
 - se reducen, se transforman en abonos.



6. Características de las baterías de condensadores

6.1. Características técnicas

Descripción

Los condensadores Varplus M cubren una extensa gama de tensiones (230 V a 690 V) y de potencias, a partir de un reducido número de referencias.

Su diseño modular permite el ensamblaje de distintos elementos para conformar potencias superiores.

Tecnología

La utilización de una película de polipropileno metalizado evita la necesidad de cualquier impregnante, proporcionando la ventaja de la autocicatrización. El sistema de protección HQ, que integra los elementos de condensadores monofásicos, avala la seguridad de su utilización al protegerlos frente a los dos tipos de defectos que pueden precipitar el fin de su vida:

■ Los defectos de elevada intensidad; se realiza con un fusible interno de alto poder de corte.

■ Los defectos de baja intensidad; se realiza con la combinación de una membrana elástica asociada a los bornes del fusible interno APR.

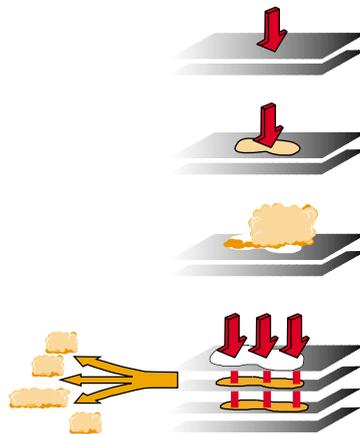
Para ambos defectos es un fusible APR normalizado el que asegura el corte del circuito eléctrico.

La envolvente plástica de los condensadores Varplus M posee doble aislamiento eléctrico y ofrece unas excelentes propiedades mecánicas y una máxima autoextinguibilidad (certificación UL 94 5 VA).

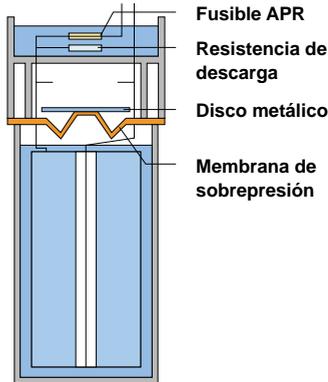


Fig. E6-001: condensadores Varplus.

1. El proceso de la autocicatrización permite despejar el defecto por evaporación del metalizado de la zona.



2. El proceso hacia el fin de la vida del condensador puede implicar un aumento de la temperatura y presión en el interior del bote. En este momento el sistema HQ empieza a actuar.



3. Corte de un elemento monofásico que muestra el sistema de protección HQ, formado por la actuación combinada de la membrana de sobrepresión que actúa por medio de un disco metálico, cortocircuitando el fusible interno y desconectando el elemento monofásico.

Ejemplo de ensamblajes de condensadores Varplus M1-M4 (400 V)

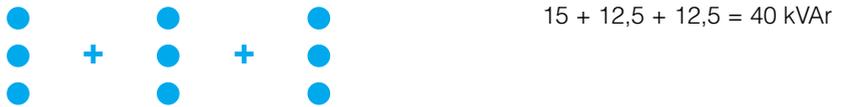


Fig. E6-002: diagrama de diferentes ensamblajes de condensadores para la obtención de potencias superiores.

Características técnicas:

- Tensión nominal: 400 V, trifásica 50 Hz
(otras tensiones: 230 V, 440 V, 525 V, 550 V, 660 V).
- Potencias máximas de ensamblaje (400 V):
 - Varios Varplus M1 = 50 kVAr.
 - Varplus M4 con Varplus M1 = 100 kVAr.
- Tolerancia sobre el valor de la capacidad: 0 + 10%.
- Clase de aislamiento:
 - Resistencia a 50 Hz, 1 minuto a 6 kV.
 - Resistencia a onda de choque 1,2/50 μ s, 25 kV.
- Intensidad máxima admisible:
 - Tipo estándar 1,3 In (400 V).
 - Clase "H": 1,5 In (400 V).
- Tensión máxima admisible (8 h cada 24 h, según CEI 831):
 - Tipo estándar: 450 V.
 - Clase "H": 520 V.
- Resistencia de descarga: incorporada, interiormente, en cada elemento monofásico.
- Pérdidas: 0,3 W/kVAr (incluyendo las pérdidas en las resistencias de descarga).
- Categoría térmica a 400 V:

Temperaturas			
Potencia (kVAr)	Máxima	Media más alta durante el período de	
		24 h	1 año
< 65 kVAr	55 °C	45 °C	35 °C
67 a 69	50 °C	40 °C	30 °C
92 a 100	45 °C	35 °C	25 °C

Tabla E6-003: temperaturas máximas admisibles en los condensadores.

- Temperatura mínima ambiental: -25 °C.
- Color:
 - Zócalo y accesorios RAL 9002.
 - Botes RAL 9005.
- Normas: CEI 831 1/2, UNE EN-60831 1/2, NF C 54-104, VDE 0560-41, CSA 22-2 n.º 190, UL 810.
- Instalación: montaje sobre soporte vertical (eje de los botes horizontal).

Baterías automáticas**Descripción**

Las baterías automáticas permiten adaptarse a las variaciones de la demanda de reactiva, en función de la programación realizada en el regulador.

- Están formadas por:
 - Condensadores Varplus M1/M4.
 - Contactores específicos para el mando de condensadores.
 - Reguladores de reactiva Varlogic R6 o R12.
 - Fusibles de protección.
- La gama se estructura en tres modelos:
 - Estándar: para su instalación en redes no polucionadas por armónicos.
 - Clase "H": para redes débilmente polucionadas.
 - Equipos SAH para redes muy polucionadas.

Características técnicas:

- Tensión nominal: 400 V, trifásica 50 Hz (otras tensiones bajo consulta).
- Tolerancia sobre el valor de la capacidad: 0 + 10%.
- Clase de aislamiento:
 - 0,66 kV.
 - Resistencia a 50 Hz 1 minuto, 2,5 kV.
- Intensidad máxima admisible:
 - Tipo estándar: 1,3 In (400 V).
 - Clase "H" 1,5 In (400 V).
- Tensión máxima admisible (8 h cada 24 h conforme a CEI 831):
 - Tipo estándar: 450 V.
 - Clase "H" 520 V.
- Categoría de temperatura ambiental a (400 V):
 - Temperatura máxima 40 °C.
 - Temperatura media en 24 h 35 °C.
 - Temperatura media anual 25 °C.
 - Temperatura mínima -25 °C.
- Índice de protección:
 - Estándar y clase "H" IP 31.
 - SAH, IP 21 (Rectimat SAH).
 - IP 54 opcional en baterías Prisma.
- Color:
 - Rectibloc, RAL 7032.
 - Minicap y Prisma color beige Prisma RAL 1019.
 - Rectimat V, RAL 7032 y RAL 7015.
- Normas CEI 439-1, UNE EN-60439-1.

Esquema tipo de conexión baterías automáticas

- C1, C2..., Cn, condensadores.
- KM1, KM2..., KMn, contactores.
- FU21: fusibles de protección circuito de mando.
- Bornas KL: bornas entrada TI.
- Bornas AB: bornas alimentación auxiliar a 230 V, 50 Hz.

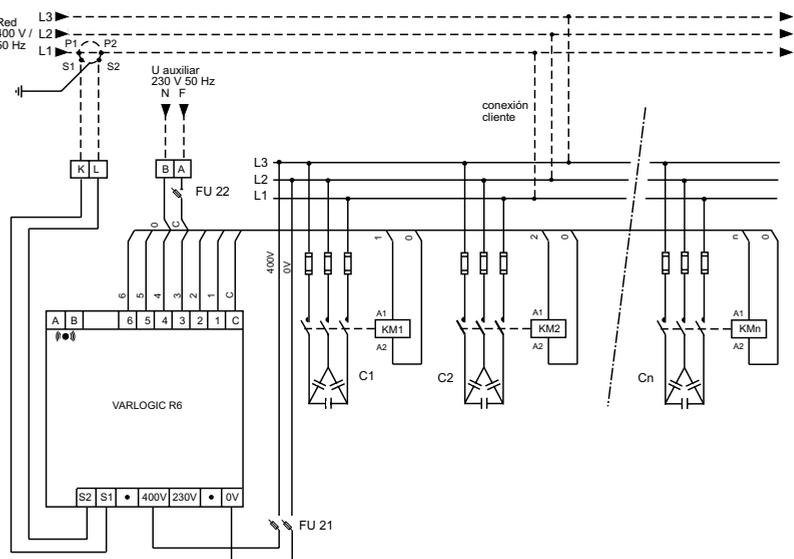


Fig. E6-004: esquema de conexión batería Rectimat V.

Reguladores Varlogic

Descripción

Los reguladores Varlogic controlan constantemente el $\cos \varphi$ de la instalación, dan las órdenes de conexión y desconexión de los escalones de la batería, para obtener el $\cos \varphi$ deseado.

■ La gama Varlogic está formada por tres aparatos:

- Varlogic R6: regulador de 6 escalones.
- Varlogic R12: regulador de 12 escalones.
- Varlogic RC12: regulador de 12 escalones con funciones complementarias de ayuda al mantenimiento.

Características técnicas:

■ Datos generales:

- Precisión 2,5%.
- Temperatura de funcionamiento: 0 a 50 °C.
- Temperatura de almacenamiento: -20 °C a +60 °C.
- Color: RAL 7021.
- Normas CEM: EN 50082-2, EN 50081-2.
- Normas eléctricas: CEI 664, VDE 0110, CEI 1010-1, EN 61010-1.
- Montaje sobre carril DIN 35 mm (EN 50022) o empotrado (taladro 138 · 138 mm -0 +1 mm).
- Pantalla de 7 segmentos (R6).
- Pantalla alfanumérica de 16 caracteres (R12 y RC12). Idiomas (inglés, francés, alemán, español).
- Contacto de alarma:
 - separado y libre de tensión,
 - mantenimiento del mensaje de alarma y anulación manual del mensaje.



Fig. E6-005: regulador Varlogic R6.



Fig. E6-006: regulador Varlogic RC12.

Entradas:

- Conexión fase-fase o fase neutro.
- Insensible al sentido de rotación de las fases y del sentido de conexión del TI (bornes K-L).
- Desconexión frente a microcortes superiores a 15 ms.
- Entrada intensidad: TI X/5 clase 1.
- Intensidad mínima de funcionamiento en el secundario del TI:
 - R6, R12: 0,18 A.
 - RC12: 0,036 A.
- Tensión:
 - R6: 220/240, 380/415 V.
 - R12, RC12: tensión de alimentación independiente 230 V, tensión de medida (red) 415 V.

Salidas:

- Contactos secos:
- CA: 2 A/400 V, 2 A/250 V, 2 A/120 V.
- CC: 0,3 A/110 V, 0,6 A/60 V, 2 A/24 V.

Ajustes y programación:

- Ajuste $\cos \varphi$ objetivo: 0,8 ind., a 0,9 cap.
- Búsqueda automática del C/K.
- Ajuste manual del C/K: 0 a 1,99.
- Programas de regulación:
 - n: (2 + lineal).
 - Ca (circular).
 - S (lineal).
 - Cb (1 + circular).
- Escalonamientos posibles / programas:
 - 1.1.1.1.1.1 Ca / n / S
 - 1.1.2.2.2.2 n
 - 1.1.2.3.3.3 n
 - 1.2.2.2.2.2 Cb / n
 - 1.2.3.3.3.3 n
 - 1.2.3.4.4.4 n
 - 1.2.4.4.4.4 n
- Temporización entre desconexiones sucesivas de un mismo escalón: ajuste digital (10 a 300 s).
- Configuración de los escalones (sólo RC12): automático, manual, desconectado.
- Aplicación generador (RC12).
- Mando manual para test de funcionamiento.

Ajustes de fábrica:

- $\cos \varphi$ deseado: 1.
- C/K: 0,5.
- Programa de regulación n.
- Temporización entre conexiones sucesivas de un mismo escalón: 50 s.

Tabla para el ajuste manual del C/K (U = 400 V)							
TI (X/5)	Potencia del primer escalón (kVAr)						
	2,5	5	7,5	10	15	30	60
100 / 5	0,18	0,36	0,54	0,72	1,08	2,17	4,33
150 / 5	0,12	0,24	0,36	0,48	0,72	1,44	2,89
200 / 5	0,09	0,18	0,27	0,36	0,54	1,08	2,17
250 / 5	0,07	0,14	0,22	0,29	0,43	0,87	1,73
300 / 5	0,06	0,12	0,18	0,24	0,36	0,72	1,44
400 / 5	0,05	0,09	0,14	0,18	0,27	0,54	1,08
600 / 5	0,03	0,06	0,09	0,12	0,18	0,36	0,72
750 / 5	0,02	0,05	0,07	0,10	0,14	0,29	0,58
800 / 5	0,02	0,05	0,07	0,09	0,14	0,27	0,54
1000 / 5	0,02	0,04	0,05	0,07	0,10	0,21	0,43
1500 / 5	0,01	0,02	0,04	0,05	0,07	0,14	0,29
2000 / 5	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,11	0,22
2500 / 5	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,09	0,17
3000 / 5	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,07	0,14

Tabla E6-007: tabla de ajuste manual de C/K para redes de 400 V.

Tabla resumen de características de los reguladores Varlogic					
Tipo	N.º de contactos de salida escalón	Tensión de alimentación (V)	Tensión de medida (V)	Ref.	
R6	6	220/240 - 380/415		52400	
R12	12	220/240	99...456 V	52401	
RC12	12	220/240	99...456 V	52402	
Informaciones suministradas			R6	R12	RC12
Cos φ			■	■	■
Escalones conectados			■	■	■
Actuación (conexión-desconexión inminente)			■	■	■
Configuración de escalones (auto-man desconectado)					■
Intensidad aparente y reactiva					■
Tasa de distorsión armónica en tensión, THD (U)					■
Tensión, temperatura, potencias (S, P, Q), Irms/In					■
Espectro de tensión armónica (rangos 3, 5, 7, 11, 13)					■
Alarma	Código	Actuación	R6	R12	RC12
Falta de kVAr	(A01)		■	■	■
Inestabilidad	(A02) Intensidad		■	■	■
Cos φ anormal	(A03) < 0,5 ind. o 0,8 cap.		■	■	■
Tensión baja	(A04) < 0,8 U ₀ (1 seg)	Desconexión (2)	■	■	■
Sobrecompensación	(A05)		■	■	■
Frecuencia no detectada	(A06) +/- 1 Hz	Paro regulación	■		
	+/- 2 Hz	Paro regulación		■	■
Sobreintensidad	(A07) > 6 A (180 s)	Paro regulación	■	■	■
Sobretensión	(A08) > 1,2 U ₀ (60 s)	Paro regulación	■	■	■
Temperatura elevada	> 35 °C (1)				■
	(A09) > 50 °C (1)	Desconexión (2)			■
Tasa de distorsión armónica	(A10) > 7% (120 s) (1)	Ct. ventilador			■
Sobrecarga escalón Irms/In	(A11) > 1,5 (120 s) (1)	Desconexión (2)			■
Pérdida de potencia	(A12)				■
Avisos		Desconexión (2)	R6	R12	RC12
Intensidad baja	(I · L ₀) < 0,24 A (2 s)		■	■	
	(I · L ₀) < 0,05 A (2 s)				■
Intensidad elevada	(I · Hi) < 5,50 A (30 s)		■	■	■
Tensión no detectada				■	■

U₀: tensión de medida

(1): umbral regulable

(2): la regulación vuelve a actuar después de la desaparición del defecto

Tabla E6-008: tabla de características generales de los reguladores Varlogic.

Contactores específicos para condensadores

Descripción

Los contactores LC1-DK están específicamente diseñados por Telemecanique para el mando de condensadores de potencia.

Están equipados con un bloque de contactos de paso adelantado al cierre de los contactos principales y conectados en serie con resistencias de preinserción, que limitan la intensidad en la conexión a 60 In.

Su concepción, patentada, garantiza la seguridad y la longevidad de los condensadores y fusibles, instalados en las baterías de Merlin Gerin.

Características técnicas:

■ Condiciones de utilización:

□ No es necesario utilizar inductancias de choque ni en baterías de un solo escalón ni de escalones múltiples.

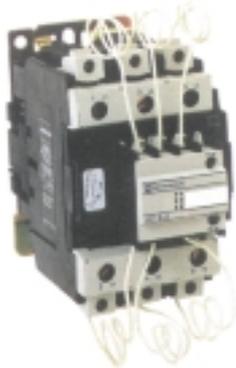


Fig. E6-009: contactor específico para mando de contactores.

□ La protección contra cortocircuitos se realizará por medio de fusibles gl de calibre comprendido entre 1,7 y 2 In.

□ Temperatura media sobre 24 h: 45 °C según normas CEI 831 y CEI 70.

■ Potencias máximas de empleo. Las potencias indicadas en la tabla E6-011 se entienden para las siguientes condiciones:

□ Corriente de cresta presumible a la conexión de 200 In.

□ Cadencia máxima:

– Los tipos LC1-DFK, DLK, DMK, 240 ciclos/hora.

– Los tipos LC1-DTK, DWK, 200 ciclos/hora.

□ Endurancia eléctrica, a la carga nominal.

– Los tipos LC1-DLK (400 V), 300.000 ciclos.

– Los tipos C1-DLK, DMK, DPK, DTK, DWK (600 V), 200.000 ciclos.

■ Circuitos de mando:

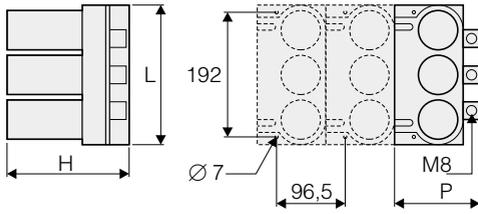
□ Tensiones disponibles: 24/42/48/110/230/240/380/400/415/440/500/600 Vca.

□ Frecuencias: 50 Hz, 60 Hz, 50-60 Hz.

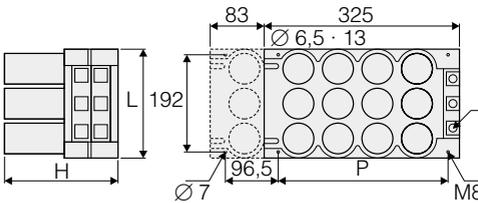
■ Normas: de conformidad a CEI 70, CEI 831, NFC 54-100, VDE 0560, UL y CSA.

Tabla de elección de contactores específicos para el mando de contactores						
220 V 240 V kVAr	400 V 440 V kVAr	660 V 690 V kVAr	Contac. "NA"	Aux. "NC"	Par de apriete Nm	Ref. básica LC1
6,7	12,5	18	1	1	1,2	DFK11..
10	20	30	1	1	1,9	DLK11..
15	25	36	1	1	2,5	DMK11..
20	33,3	48	1	2	5	DPK12..
25	40	58	1	2	5	DTK12..
40	60	92	1	2	11	DWK12..

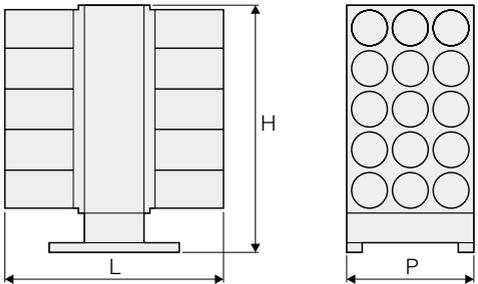
Tabla E6-010: tabla de elección de contactores específicos para el mando de condensadores.



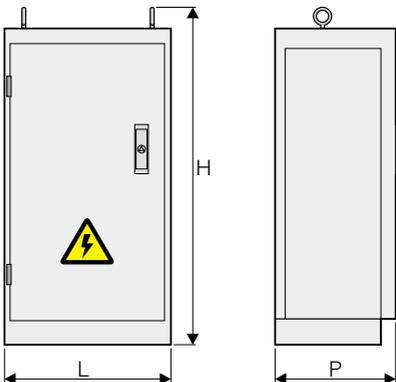
Varplus M1 estándar, clase H						
Potencia (kVAr)		Dimensiones (mm)			Peso (kg)	
Tipo estándar 400 V	230 V	Clase H 400 V	H	L		P
2,5	2,5		210	218	116	2,5
	3,8	3,7	210	218	116	2,5
5	5		210	218	116	2,5
	5,5	5,5	210	218	116	2,5
7,5	7,5	7,5	210	218	116	2,5
10		10,3	210	218	116	2,5
		11,5	210	218	116	2,5
	12,5		210	218	116	2,5
15			210	218	116	2,5



Varplus M4 estándar, clase H						
Potencia (kVAr)		Dimensiones (mm)			Peso (kg)	
Tipo estándar 400 V	230 V	Clase H 400 V	H	L		P
	30		210	218	350	10
	32,5		210	218	350	10
		41,1	210	218	350	10
		45	210	218	350	10
50			210	218	350	10
60			210	218	350	10



Varplus gran potencia estándar, clase H						
Potencia (kVAr)		Dimensiones (mm)			Peso (kg)	
Tipo estándar 400 V	230 V	Clase H 400 V	H	L		P
	50		460	544	215	22
	60		460	544	215	22
	70		555	544	215	32
		80	460	544	215	26
		90	555	544	215	32
100			460	544	215	26
		105	555	544	215	32
		120	555	544	215	32
120			460	544	215	26
140			555	544	215	32

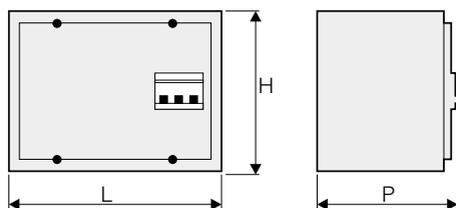


Varplus SAH					
Potencia (kVAr)		Dimensiones (mm)			Peso (kg)
Tipo SAH 400 V		H	L	P	
12,5		1.000	800	500	■
25		1.000	800	500	■
37,5		1.000	800	500	■
50		1.000	800	500	■
75		1.000	800	500	■
100		1.000	800	500	■
125		1.000	800	500	■
150		1.000	800	500	■

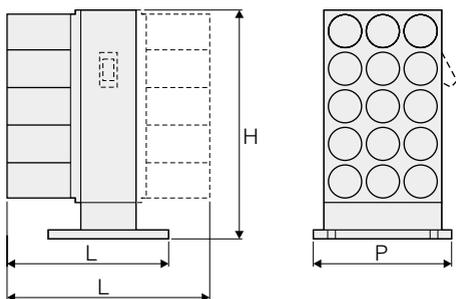
■ Consultar.

Tabla E6-011: condensadores Varplus M1, M4 gran potencia.

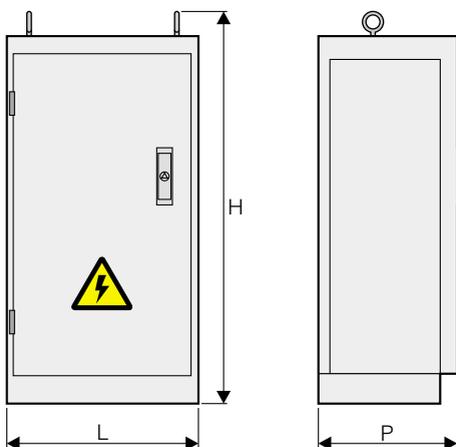
Condensadores con interruptor automático Rectibloc



Rectibloc en cofret estándar y clase H						
Potencia (kVAr)			Dimensiones (mm)			Peso (kg)
Tipo estándar 400 V	230 V	Clase H 400 V	H	L	P	
10	5	7,5	240	340	270	9
15	7,5	10	240	340	270	9
20	10	15	240	340	270	11



Rectibloc sobre zócalo, estándar y clase H						
Potencia (kVAr)			Dimensiones (mm)			Peso (kg)
Tipo estándar 400 V	230 V	Clase H 400 V	H	L	P	
25	12,5	20	460	500	218	13
30	15	22,5	460	500	218	13
40	20	30	460	500	218	16
	25	35	460	500	218	16
50		40	460	500	218	18
60	30	45	460	500	218	21
70	35	52,5	555	500	218	21
	40	60	555	500	218	21
80	50	70	460	575	218	24
100	60	80	460	575	218	28
120	70	90	460	575	218	28
		105	555	575	218	34

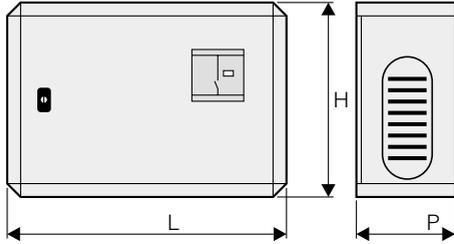


Rectibloc SAH						
Potencia (kVAr)			Dimensiones (mm)			Peso (kg)
Tipo estándar 400 V	230 V	Clase H 400 V	H	L	P	
25			1.000	800	500	■
37,5			1.000	800	500	■
50			1.000	800	500	■
75			1.000	800	500	■
100			1.000	800	500	■
125			1.000	800	500	■
150			1.000	800	500	■

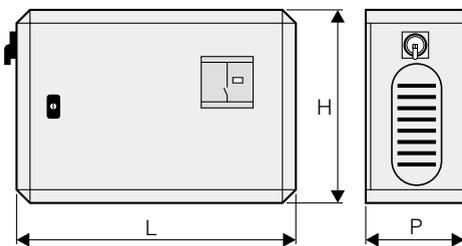
Tabla E6-012: condensadores Rectibloc con interruptores automáticos.

Baterías automáticas Minicap

Minicap sin seccionador



Minicap con seccionador

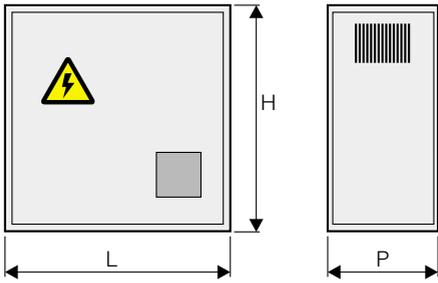


Minicap					
Potencia (kVAr)		Dimensiones (mm)			Peso (kg)
Tipo estándar		H	L	P	
400 V	230 V				
Sin seccionador					
7,5	3,75	400	550	255	25
10	5	400	550	255	25
12,5	6,25	400	550	255	25
15	7,5	400	550	255	25
17,5	8,75	400	550	255	25
20	10	400	550	255	25
22,5	11,3	400	550	255	25
25	12,5	400	550	255	25
30 (1.2.2)	15 (1.2.2)	400	550	255	25
30	15	600	550	255	35
35	17,5	600	550	255	35
37,5	18,8	600	550	255	35
40 (Reg.10)	20 (Reg.5)	600	550	255	35
45		600	550	255	35
40 (Reg.5)	20	800	550	255	45
50	22	800	550	255	45
52,5	22,5	800	550	255	45
55		800	550	255	45
60		800	550	255	45
62,5		800	550	255	45
67,5		800	550	255	45
70		1.000	550	255	45
75		1.200	550	255	50
90		1.200	550	255	45
Con seccionador					
7,5		400	587	255	26
10		400	587	255	26
12,5		400	587	255	26
15		400	587	255	26
17,5		400	587	255	26
20		400	587	255	26
22,5		400	587	255	26
25		400	587	255	26
30 (Reg. 10)		400	587	255	26
30		800	587	255	46
35		800	587	255	46
37,5		800	587	255	46
40		800	587	255	46
45		800	587	255	46
50		800	587	255	46
52,5		800	587	255	46

Tabla E6-013: baterías automáticas Minicap.

Baterías automáticas Rectimat 2 estándar, clase H, clase SAH

Rectimat 2, cofrets 1 y 2

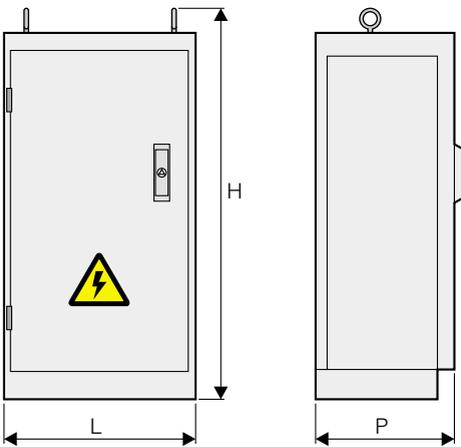


Rectimar 2, estándar, clase H, clase SAH

	Dimensiones (mm)		
	H	L	P
Cofret	800	500	250
Armario 1	1.000	550	500
Armario 2	1.000	800	500
Armario 3	2.100	800	500
Armario 3B	2.100	1.350	500
Armario 4	2.100	1.600	500
Armario 4B	2.100	2.150	500

Tabla E6-014: baterías automáticas Rectimat 2 estándar, clase H, clase SAH.

Rectimat 2, armarios 1 y 2



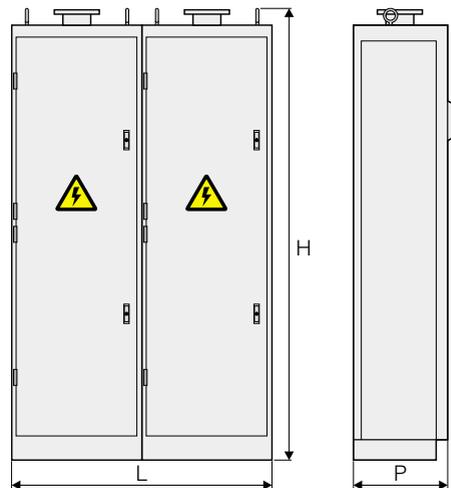
Armario 1

Potencia máxima 180 kVAr/400 V
2 módulos de compensación

Armario 2

Potencia máxima 270 kVAr/400 V
3 módulos de compensación

Rectimat 2, armarios 3 y 4



Armario 3

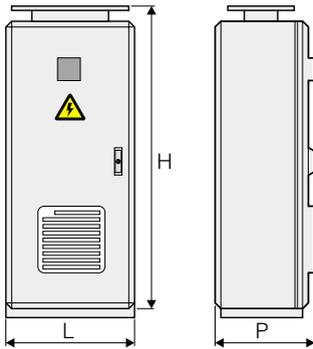
Potencia máxima 450 kVAr/400 V
5 módulos de compensación

Armario 4

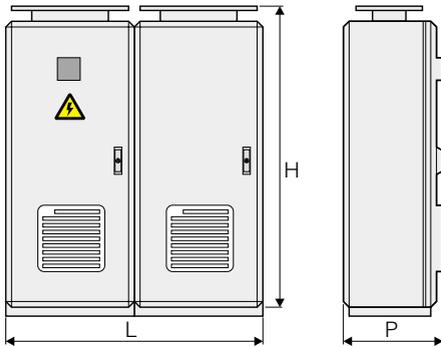
Potencia máxima 900 kVAr/400 V
10 módulos de compensación

Baterías automáticas Prisma estándar, clase H, clase SAH

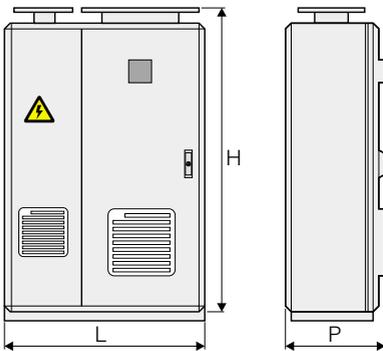
Batería Prisma, armario simple



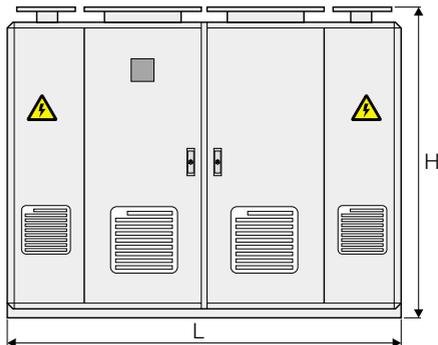
Batería Prisma, armario doble



Batería Prisma SAH, armario simple



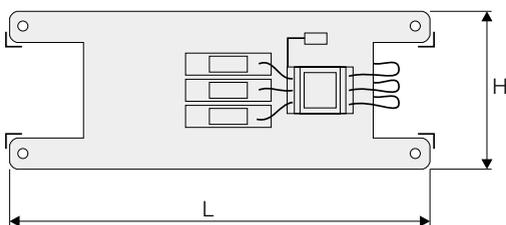
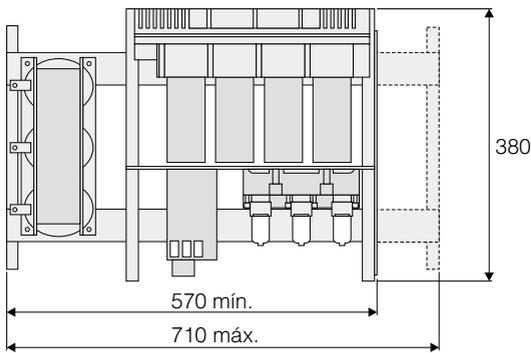
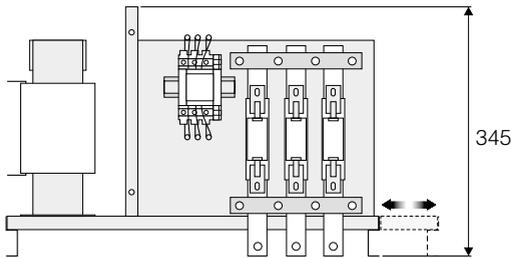
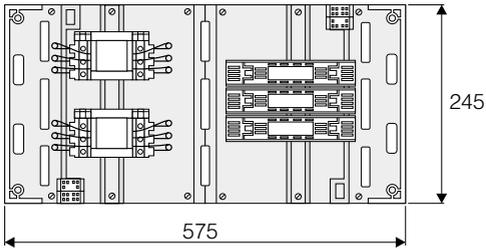
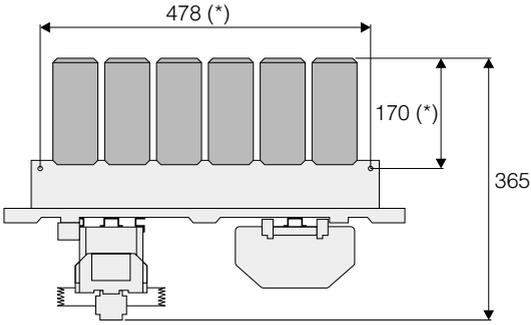
Batería Prisma SAH, armario doble



Prisma					
Potencia (kVAr)		Dimensiones (mm)			Peso (kg)
Tipo estándar	Clase H 230 V	H	L	P	
Armario simple					
150	160	2.080	725	480	210
	180	2.080	725	480	210
180	200/225	2.080	725	480	215
200	400	2.080	725	480	220
210	270	2.080	725	480	230
240	315	2.080	725	480	230
250		2.080	725	480	260
270		2.080	725	480	260
300		2.080	725	480	260
360		2.080	725	480	280
420		2.080	725	480	300
Armario doble					
480	360	2.080	1.428	480	390
540	405	2.080	1.428	480	410
600	450	2.080	1.428	480	430
660	495	2.080	1.428	480	450
720	540	2.080	1.428	480	470
Prisma SAH					
Potencia (kVAr)		Dimensiones (mm)			Peso (kg)
Tipo estándar	Clase H 230 V	H	L	P	
Armario simple					
150		2.080	1.025	480	330
175		2.080	1.025	480	350
200		2.080	1.025	480	350
250		2.080	1.025	480	380
300		2.080	1.025	480	410
350		2.080	1.025	480	440
Armario doble					
400		2.080	2.025	480	540
450		2.080	2.025	480	570
500		2.080	2.025	480	600
550		2.080	2.025	480	630
600		2.080	2.025	480	660

Tabla E6-015: baterías automáticas Prisma estándar, clase H, clase SAH.

P400/P400 SAH y pletinas funcionales



P400			
Dimensiones (mm)			Peso (kg)
H	L	P	
365	478	400	

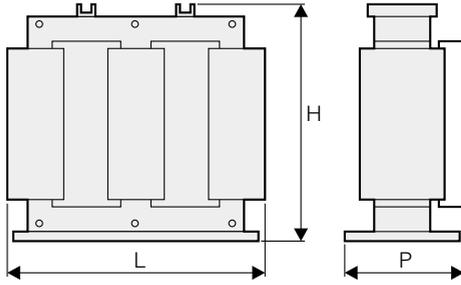
P400 SAH			
Dimensiones (mm)			Peso (kg)
H	L	P	
380	570	400	

Pletina funcional Prisma para armarios Prisma			
Dimensiones (mm)			Peso (kg)
H	L	P	
221	596	405	

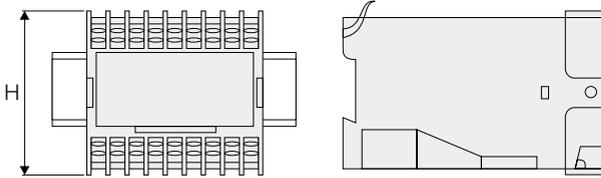
Tabla E6-016: P400/P400 SAH y pletinas funcionales.

E
6

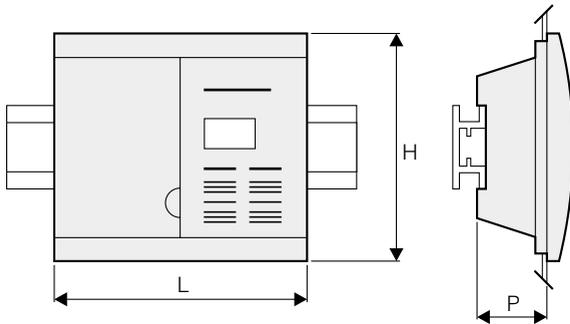
Inductancias y accesorios



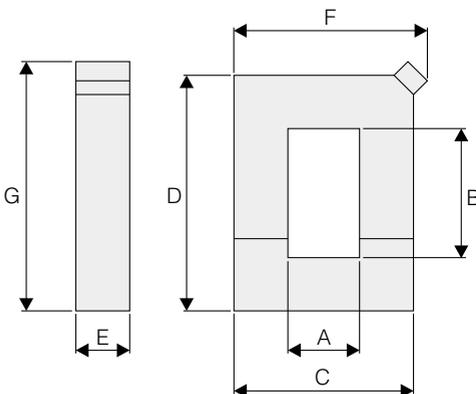
Inductancias antiarmónicos SAH				
Potencia kVAr	Dimensiones (mm)			Peso (kg)
	H	L	P	
12,5	205	200	130	11
25	200	275	175	20
50	235	280	185	30



Transformadores sumadores vectoriales				
Número de sumas	Dimensiones (mm)			Peso (kg)
	H	L	P	
2	73	75	112	
3	73	75	112	
4	73	150	112	
5	73	150	112	



Regulador de energía reactiva Varlogic						
Ref. Varlogic	Troquel en mm	Dimensiones (mm)			Peso (kg)	
		H	L	P		
R6	138+0,1	144	144	80	0,65	
R12	138+0,1	144	144	90	1,0	
RC12	138+0,1	144	144	90	1,0	



Transformadores de intensidad de núcleo abierto X/5								
Sección interior mm	Dimensiones (mm)							
	a	b	c	d	e	f	g	
T1 - X/5 núcleo abierto								
20 · 30	22	32	90	100	34	98	107	
50 · 80	55	82	120	150	34	128	158	
80 · 100	82	104	150	172	34	157	179	
80 · 125	82	127	150	195	34	157	203	

Tabla E6-017: inductancias y accesorios.

6.2. Dimensionado de los elementos de instalación y protección

Debido a las posibles corrientes armónicas y a las tolerancias de fabricación, sobre la capacidad de los condensadores, la aparamenta de protección de condensadores debe sobredimensionarse un 43%.

Dimensionado de los componentes

El dimensionado de los cables, de la aparamenta de maniobra y protección, aguas arriba de la batería, depende de la corriente absorbida por la batería.

Para las baterías de condensadores, la corriente absorbida es función de:

- La potencia.
- La tensión aplicada.
- Los armónicos de la red.

La corriente nominal de un condensador es:

- Para una red trifásica:

$$I_n = \frac{Q}{\sqrt{3} U_n}$$

- Para una red monofásica:

$$I_n = \frac{Q}{U_0}$$

I_n = intensidad nominal (en A).

Q = potencia del condensador (en VAr).

U = tensión compuesta (en V).

U_0 = tensión simple (en V).

Las variaciones admisibles de la tensión y los posibles armónicos de la red pueden producir un incremento del 30% de la corriente nominal.

Las variaciones de la potencia de los condensadores, consecuencia de las tolerancias de fabricación, que por normativa pueden llegar hasta un 15 % de incremento de la intensidad.

En el caso de los condensadores Varplus de Merlin Gerin, el incremento por tolerancia máximo es del 10%.

La suma de los dos parámetros puede llegar a valores de $1,3 \cdot 1,10 = 1,43$ In.

El dimensionado de un 50% de incremento de las instalaciones, aguas arriba de una batería, corresponde a una temperatura ambiental de 50 °C. En caso de otras temperaturas se debería efectuar un estudio de corrección.

Las protecciones

- Protecciones externas:

La conexión de condensadores es equivalente al cierre en cortocircuito: durante el tiempo de conexión, lógicamente disminuyendo en función de la carga, por tanto un transitorio durante el tiempo de carga.

- La corriente de cresta, para un condensador, en estas condiciones será:

$$I_p = U \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L_0}}$$

– Para un condensador unitario, la impedancia aguas arriba se limita a la impedancia de los conductores, transformadores..., que limita la corriente aguas arriba.

– Por una batería automática de condensadores, en el momento que conectamos un escalón nuevo, aparte de la corriente de carga proveniente de la fuente de alimentación, se suma una corriente de descarga, muy importante, de los demás escalones ya conectados y cargados.

□ El valor de cresta de la corriente que circula en el escalón nuevo puede llegar a:

$$I_p = U \frac{n}{n+1} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{C}{L_0}}$$

I_p = corriente de cresta de conexión.

U = tensión de la red.

n = n.º de escalones bajo tensión.

C = capacidad de un escalón.

L_0 = inductancia de cortocircuito de la red.

L = inductancia de las conexiones del juego de barras al condensador.

Por normativa esta corriente de cresta debe ser inferior a $100 I_{ne}$ (escalón).

Para poder disminuir I_{ne} se deben instalar bobinas de choque (consultar al fabricante de la batería).

Hoy en día, existen contactores con bobinas de choque incorporadas, capaces de limitar las corrientes a $80 I_n$, como el caso de los contactores utilizados en las baterías de Merlin Gerin.

Los interruptores automáticos y los fusibles de protección deberán poder absorber las corrientes de cresta sin desconectar.

Para los interruptores automáticos su desconexión instantánea debe ser superior a $12 I_n$ y su capacidad de cierre debe ser superior a la intensidad de cortocircuito de la red, en su punto de conexión.

Sección de los conductores

La corriente de empleo debe ser $1,5 I_n$, la corriente nominal del condensador.

Las tablas del capítulo F permiten definir las secciones del conductor.

De forma orientativa, podemos definir las secciones de los conductores:

■ Condensadores alimentados a 400 V: cables capaces de soportar 2 A por kVAr.

■ Condensadores alimentados a 230 V: cables capaces de soportar 3,5 A por kVAr.

Protección de condensadores

Para los condensadores Varplus, la tolerancia sobre el valor de la capacidad es inferior o igual al 10%.

El incremento de la corriente, en función del incremento de la tensión y con la acción de las corrientes armónicas, a un valor del 30%, nos lleva a un valor conjunto de:

$$13 \cdot 110 = 1,43 I_n$$

La corriente de empleo I_b , utilizada para determinar la corriente asignada del dispositivo de protección, será $1,43 I_n$, tanto para los condensadores estándar o los sobredimensionados de Merlin Gerin.

Los catálogos de la aparata de BT de las marcas de Schneider Electric dan las tablas de elección y regulación de la aparata para la utilización de protección de condensadores, para una temperatura de trabajo de $50\text{ }^\circ\text{C}$, en función de la potencia y la tensión de la batería de condensadores.

Un extracto de estas tablas las reflejamos en el cuadro siguiente:

Redes trifásicas 400 V		
Potencia batería kVAr	Interruptor automático	Calibre o Ir (A)
100	C250 N/H/L C400 N/H/L ST204S	D200 200
120	C250 N/H/L C400 N/H/L ST204S	D250 240
140	C401 N/H/L C400 N/H/L ST204S C630 N/H/L ST204S	D321 280 285

Tabla E6-018: tabla de dimensionado de interruptores automáticos para la protección de baterías.

Ejemplos:

Condensador 100 kVAr.

Tensión 400 V trifásico.

Intensidad nominal del condensador (batería).

$$I_r = \frac{100.000 \text{ VAr}}{1,732 \cdot 400 \text{ V}} = 145 \text{ A}$$

Intensidad de empleo:

$$I_b = 143 \cdot 145 \text{ A} =$$

El calibre del interruptor automático deberá ser igual o superior a 207 A.

Ateniéndonos a la tabla adjunta podemos elegir entre un C250 N/H/L calibre D200 o un C400 N/H/L ST240S calibre 200.

Recomendaciones de instalación

Dimensionado de los cables:

- Sección del cable de conexión de los transformadores de intensidad: 2,5 mm² como mínimo.
- Dimensionado de los cables de potencia:
 - Prever 3,5 A por kVAr a 230 V.
 - Prever 2 A por kVAr a 400 V.

Conexión del TI (circuito de medida de intensidad):

- Situación del TI:
 - Verificar que el transformador de intensidad esté instalado aguas arriba de la batería y de todas las cargas.
 - Identificar una de las fases como fase 1.
- Verificación de la correcta conexión de la fase 1 de la batería. Cerciorarse que la fase 1 de la batería es la que lleva conectado el transformador de intensidad.

En caso de duda, conectar un voltímetro entre el borne L1 del equipo y la fase donde está el transformador de intensidad.

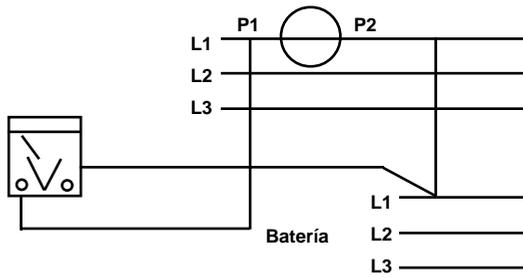


Fig. E6-019: identificación de la misma fase con un voltímetro.

El voltímetro debe marcar 0 V; si no es así, cambie el TI a la fase adecuada, o mantenga el TI en su sitio y permute los cables de potencia de alimentación de la batería hasta alcanzar la posición deseada.

■ **Conexión del TI a la batería.**

Conecte los cables provenientes del TI en el regletero del equipo: S1 en el borne K y S2 en el borne L.

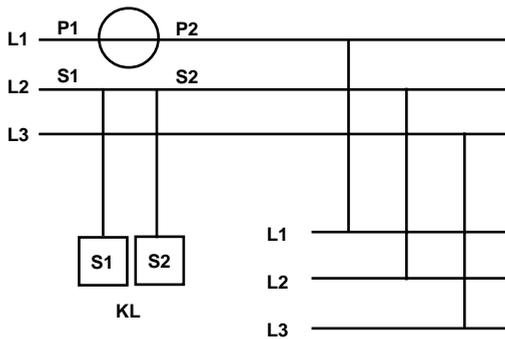


Fig. E6-020: forma de conexión del transformador de intensidad.

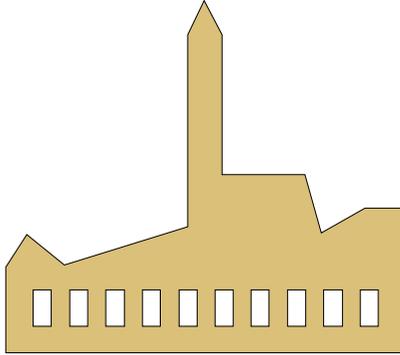
Conexión a tierra

Efectúe la conexión al borne identificado en el equipo para esta función.

Conexión de los dos cables de alimentación de la maniobra a los bornes correspondientes.

Comprobación del par de apriete de los bornes de potencia.

7. Ejemplos



Cálculo de la compensación del factor de potencia de una industria

Descripción de la industria

Una industria de inyección de plásticos, con nave de inyección, almacenaje y oficinas. La zona de inyección dispone de 150 m², el cuarto de compresores 50 m², la zona de almacenaje, carga y descarga 200 m², taller de mantenimiento 300 m², oficinas 150 m².

Potencias aparentes de las diferentes zonas de carga:

■ Zona máquinas de inyección:

Sz-1 = 63,98 kVA

■ Zona compresores:

Sz-2 = 12,6 kVA

■ Zona taller de mantenimiento:

Sz-3 = 18,9 kVA

■ Zona almacén de expediciones:

Sz-4 = 8,46 kVA

■ Zona oficinas:

Sz-5 = 14,13 kVA

La descripción de las cargas la encontraremos en el apartado 4 del capítulo B, pág. B/67.

El consumo y el reparto de las cargas durante los doce meses de un año, así como el tipo de contrato que se puede realizar con la empresa suministradora de la energía, lo encontraremos en el apartado 5 del capítulo D, pág. D/111.

Justificación de la elección de la forma de compensar

La zona de solicitud de máxima potencia reactiva es la zona de máquinas. Las máquinas específicas para la inyección de plásticos poseen dos consumos principales:

■ El motor para mantener la presión del sistema hidráulico,

■ Las resistencias de calefacción para la plastificación del material.

De las dos cargas, el motor necesita energía reactiva para crear los campos para el movimiento giratorio del eje del motor.

El ciclo de trabajo de la máquina es corto:

■ Cierre, el motor da presión al sistema hidráulico para que pueda actuar el cilindro de cierre (2 a 3").

■ Inyección, el motor mantiene la presión para la actuación del cilindro de presión (3 a 5").

- Enfriamiento del material en el molde (6 a 12”), el motor no actúa durante este período, que es el más largo; las electroválvulas mantienen la presión.
- Apertura y expulsión (2 a 4”), el motor vuelve a actuar para mantener la presión del circuito hidráulico en las maniobras de apertura y expulsión.

Nota: El ejemplo de tiempos es del tipo orientativo, puesto que oscilan en función de la pieza, el material y la calidad de la misma.

Cómo compensar

Si compensamos el motor individualmente tendremos que en cada ciclo deberemos descargar la batería de condensadores, operación de descarga superior al tiempo de paro del motor; por tanto, debemos pensar en una compensación global.

Si el alumbrado, que es el segundo punto de consumo de energía reactiva, está realizado con tubos fluorescentes compensados hasta un $\cos \varphi = 0,86$, el sistema más adecuado será una compensación global.

Cálculo de la potencia y el $\cos \varphi$ medio de la fábrica

La industria trabaja:

- A tres turnos la parte de inyección y compresores, 360 días al año.
- A dos turnos el taller de mantenimiento, 222 días al año.
- A un turno el almacén de expediciones y las oficinas, 222 días al año.

Cuadro de potencias y consumos									
Descripción	S(kVA)	Kc	Cos φ	kVA/h (turnos)			kW/h (turnos)		
				1.º	2.º	3.º	1.º	2.º	3.º
Sala de máquinas									
Máquina n.º 1	10,30	0,5	0,83	41,20	41,20	41,20	34,20	34,20	34,20
Máquina n.º 2	14,20	0,5	0,86	56,80	56,80	56,80	48,85	48,85	48,85
Máquina n.º 3	14,20	0,5	0,86	56,80	56,80	56,80	48,85	48,85	48,85
Máquina n.º 4	24,00	0,5	0,86	96,00	96,00	96,00	82,56	82,56	82,56
Máquina n.º 5	3,50	0,5	0,80	14,00	14,00	14,00	11,20	11,20	11,20
T. corriente	21,04	1	0,80	84,16	84,16	84,16	67,33	67,33	67,33
Alumbrado	4,2	0,8	0,86	29,90	29,90	29,90	25,72	25,72	25,72
Climatización	16,5	0,6	0,80	79,20	79,20	79,20	63,36	63,36	63,36
Zona de compresores									
Compresor	7,60	0,7	0,80	42,56	42,56	42,56	34,05	34,05	34,05
T. corriente	2,80	1	0,80	22,40	22,40	22,40	17,92	17,92	17,92
Alumbrado	3,50	0,8	0,86	22,40	22,40	22,40	17,92	17,92	17,92
Taller de mantenimiento									
Potencia	21,00	0,9	0,80	151,20	151,20		120,96	120,96	
Alumbrado	4,2	0,6	0,86	20,16	20,16		17,34	17,34	
Almacén y expediciones									
Potencia	10,00	0,6	0,80	48,00			38,4		
Alumbrado	1,40	0,6	0,86	6,72			5,78		
Oficinas									
Potencia	3,80	0,9	0,90	27,36			24,63		
Alumbrado	3,60	0,7	0,86	20,16			17,34		
Climatización	15,00	0,6	0,80	72,00			57,6		
Sumas				891,02	716,78	545,4	734,01	590,26	451,9
Cos φ medio							0,823	0,823	0,828
Potencia media consumida (kW)							91,75	73,78	56,49
Coefficiente [cos φ (de 0,82 a 0,98)]							0,489	0,489	0,489
Potencia energía reactiva (kVAr)							45	36	28
Potencia instalada (kVA) generadora de armónicos							16,9	11,9	7,7
Relación P.G.A., con la potencia C.T., 630 kVA							2,7%	1,9%	1,2%

Tabla E7-001: tabla de valores del ejemplo de cálculo de compensación industrial.

Cálculo de la batería

El cálculo de la batería lo podemos realizar con programas informáticos, introduciendo los datos de:

- Potencia en kW.
- Cos φ existente.
- Cos φ deseado.

Pero para facilitar la comprensión expondremos los pasos realizados y expresados en la tabla E7-001.

1.º paso:

Hemos buscado, de forma aproximada, el tiempo real que está trabajando cada carga. En función de su ciclo: las máquinas; de las horas de encendido: el alumbrado; y del tiempo de funcionamiento para la manutención térmica: el acondicionamiento de aire.

Una advertencia: hemos introducido un coeficiente de consumo medio K_c que no corresponde al coeficiente de utilización K_u , que hemos utilizado para el dimensionamiento de la instalación.

- El coeficiente de consumo medio nos interesa para acercarnos al consumo medio en kW/año.
- El coeficiente de utilización K_u nos interesa para poder dimensionar una instalación, capaz de suministrar la energía necesaria en cada momento, para cada carga y en función de su rendimiento. Está ligado al coeficiente de simultaneidad K_s .

2.º paso:

Hemos realizado el producto de la potencia de cada carga en kVA por el coeficiente de consumo medio en cada turno de trabajo, obteniendo los kVA/h medios consumidos en cada turno.

$$S_{(kVAh)} = S_{(kVA)} \cdot K_c \cdot 8_{h/turno}$$

Es habitual que el coeficiente de consumo varíe en función del turno, por ejemplo: el alumbrado no tendrá las mismas horas/año de media de encendido, el primer turno que el segundo o el tercero, pero para no extender demasiado el ejemplo hemos considerado el mismo coeficiente de media para los cuatro turnos de la industria.

3.º paso:

El mismo proceso que el segundo, pero para la potencia activa, multiplicando por el cos φ :

$$S_{(kVA/h)} = S_{(kVA)} \cdot K_c \cdot 8_{h/turno} \cdot \cos \varphi$$

4.º paso:

Hemos identificado las cargas que producen armónicos.

Como que los motores no disponen de variadores de velocidad, solamente arrancadores electromecánicos, los generadores de armónicos son las reactividades saturadas de los tubos fluorescentes.

Es probable que en la realidad, una vez la industria en funcionamiento, exista alguna carga no identificada en el proyecto que sea generadora de armónicos; es obvio que deberemos reconsiderar el estudio en el momento de la puesta en servicio y en términos generales después del primer año de trabajo.

5.º paso:

Sumar los consumos por turno.

6.º paso:

Buscar el $\cos \varphi$ medio por turno. Si tenemos la potencia aparente consumida por turno y la potencia activa consumida por turno, con una simple operación tenemos el $\cos \varphi$ medio por turno.

$$\cos \varphi = \frac{P_{(kW)}}{S_{(kVA/h)}}$$

7.º paso:

Definir el $\cos \varphi$ medio deseado. En este caso, $\cos \varphi = 0,98$.

8.º paso:

Buscar en la tabla E5-003 el coeficiente correspondiente al $\cos \varphi$ medio que tenemos por turno y el deseado. En este caso, 0,489.

9.º paso:

Cálculo de la batería necesaria por turno.

■ A partir del consumo por turno podemos definir la potencia activa media por turno:

$$P_{(kW)} = \frac{P_{(kVA/h)}}{8_{h/turno}}$$

□ Primer turno:

$$P_{(kW)} = \frac{P_{(kVA/h)}}{8_{h/turno}} = \frac{734,01}{8} = 92 \text{ kW}$$

□ Segundo turno:

$$P_{(kW)} = \frac{P_{(kVA/h)}}{8_{h/turno}} = \frac{590,26}{8} = 74 \text{ kW}$$

□ Tercer turno:

$$P_{(kW)} = \frac{P_{(kVA/h)}}{8_{h/turno}} = \frac{451,9}{8} = 56 \text{ kW}$$

10.º paso:

Calcular la potencia y la proporcionalidad de los generadores de armónicos.

■ La potencia:

Si seguimos los mismos pasos que hemos realizado para conocer la potencia activa media total por turno, pero con las cargas generadoras de armónicos (en el cuadro bajo franja de color rosa) con la potencia aparente, tendremos:

□ Primer turno, 16,9 kVA.

□ Segundo turno, 11,9 kVA.

□ Tercer turno, 7,7 kVA.

■ La proporcionalidad:

La proporcionalidad ha de referirse a la potencia aparente del transformador de suministro.

Puestos en contacto con la empresa suministradora, nos indica que nos suministra desde un CT, con un transformador de 630 kVA:

$$\% = \frac{100 \cdot S_{armónicos}}{S_{transformador}}$$

□ Primer turno:

$$\% = \frac{100 \cdot 16,9 \text{ kVA}}{630 \text{ kVA}} = 2,7\%$$

□ Segundo turno:

$$\% = \frac{100 \cdot 11,09 \text{ kVA}}{630 \text{ kVA}} = 1,9\%$$

□ Tercer turno:

$$\% = \frac{100 \cdot 7,7 \text{ kVA}}{630 \text{ kVA}} = 1,2\%$$

Esta proporcionalidad es menor del 15%; por tanto, con soluciones estándar podemos solucionar la compensación.

Modelo: Minicap 400 V estándar.

Potencia: 45 kVAr.

Escalones: 7,5 + 7,5 + 2 · 15.

Regulación: 1-1-2-2.

Ref. 530816C.

Qué cambios de recargos y bonificaciones representa la compensación

Antes de compensar:

$$Kr = \frac{17}{0,82^2} - 21 = +4,28\%$$

Después de compensar:

$$Kr = \frac{17}{0,98^2} - 21 = -3,3\%$$

Pasaremos de un recargo a la factura sobre los términos de potencia y energía de un 4,28 % a una bonificación de un 3,3 %, o sea, que compraremos la energía un 7,58 % más económica.

INSTALACIÓN DE RECEPTORES. PRESCRIPCIONES GENERALES ITC-BT-42

2.7. Compensación del factor de potencia

Las instalaciones que suministren energía a receptores que resulte un factor de potencia inferior a 1, podrán ser compensadas, pero sin que en ningún momento la energía absorbida por la red pueda ser capacitativa.

La compensación del factor de potencia podrá hacerse de una de las dos formas siguientes:

- Por cada receptor o grupo de receptores que funcionen simultáneamente y se conecten por medio de un sólo interruptor. En este caso el interruptor debe cortar la alimentación simultáneamente al receptor o grupo de receptores y al condensador.
- Para la totalidad de la instalación. En este caso, la instalación de compensación debe estar dispuesta para que, de forma automática, asegure que la variación del factor de potencia no sea mayor de un $\pm 10\%$ del valor medio obtenido durante un prolongado período de funcionamiento.

Cuando se instalen condensadores y la conexión de éstos con los receptores pueda ser cortada por medio de interruptores, los condensadores irán provistos de resistencias o reactancias de descarga a tierra.

Los condensadores utilizados para la mejora del factor de potencia en los motores asíncronos se instalarán de forma que, al cortar la alimentación de energía eléctrica al motor, queden simultáneamente desconectados los indicados condensadores.

Las características de los condensadores y su situación deberán ser conformes a lo establecido en la norma UNE-EN 60831-1 y UNE-EN 60831-2.

INSTALACIÓN DE RECEPTORES. RECEPTORES PARA ALUMBRADO ITC-BT-44

3.1. Condiciones generales

En instalaciones de iluminación

Para receptores con lámparas de descarga, la carga mínima prevista en voltiamperios será de 1,8 veces la potencia en vatios de las lámparas. En el caso de distribuciones monofásicas, el conductor neutro tendrá la misma sección que los de la fase. Será aceptable un coeficiente diferente para el cálculo de la sección de los conductores, siempre y cuando el factor de potencia de cada receptor sea mayor o igual a 0,9 y si se conoce la carga que supone cada uno de los elementos asociados a las lámparas y las corrientes de arranque, que tanto éstas como aquéllos puedan producir. En este caso, el coeficiente será el que resulte.

INSTALACIÓN DE RECEPTORES. TRANSFORMADORES Y AUTOTRANSFORMADORES, REACTANCIAS Y RECTIFICADORES, CONDENSADORES ITC-BT-48

En el caso de receptores con lámparas de descarga será obligatoria la compensación del factor de potencia hasta un valor mínimo de 0,9, y no se admitirá compensación en conjunto de un grupo de receptores en una instalación de régimen de carga variable, salvo que dispongan de un sistema de compensación automático con variación de su capacidad siguiendo el régimen de carga.

2.3. Condensadores

Los condensadores que no lleven alguna indicación de temperatura máxima admisible no se podrán utilizar en lugares donde la temperatura ambiente sea 50 °C o mayor. Si la carga residual de los condensadores pudiera poner en peligro a las personas, llevarán un dispositivo automático de descarga o se colocará una inscripción que advierta este peligro. Los condensadores con dieléctrico líquido combustible cumplirán los mismos requisitos que los reostatos y reactancias.

Para la utilización de condensadores por encima de los 2.000 m, de altitud sobre el nivel del mar, deberán tomarse precauciones de acuerdo con el fabricante, según especifica la Norma UNE-EN 60.831-1.

Los condensadores deberán estar adecuadamente protegidos, cuando se vayan a utilizar con sobreintensidades superiores a 1,3 veces la intensidad correspondiente a la tensión asignada a frecuencia de red, excluidos los transitorios.

Los aparatos de mando y protección de los condensadores deberán soportar, en régimen permanente, de 1,5 a 1,8 veces la intensidad nominal asignada del condensador, a fin de tener en cuenta los armónicos y las tolerancias sobre las capacidades.